
POUR LA SCIENCE
PHYSIQUE
L'énigme de la durée de vie du neutron
NEUROBIOLOGIE
Gélifier le cerveau pour mieux l'explorer
ASTRONOMIE
OSIRIS-REx, pour un zeste d'astéroïde
POUR LA
SCIENCE
Octobre 2016 - n° 468
Édition française de Scientific American
ÉVOLUTION
Le surprenant succès des mammifères au temps des dinosaures
BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ESP : 7,2 € - GR : 7,2 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF - PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,6 TND
M 02687 - 468 - F: 6,50 € - RD





Le livre-cadeau offert* en librairie pour célébrer la science

dès le 8 octobre

Contient un lecteur d'hologrammes à monter soi-même

25 *découvertes*

POUR LES 25 ANS DE LA FÊTE DE LA SCIENCE

Contient un lecteur d'hologrammes à monter soi-même!

Sciences pour tous | fête de la Science

* Livre gratuit ne peut être vendu. Offert pour l'achat d'un livre de sciences, dans la limite des stocks disponibles. Liste des libraires participants sur sciencespourtous.org







8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté d'Alice Maestracci et William Rowe-Pirra
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, assistés de Cassandra Vion
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Guillaume Chalons, Laurence Denis, Alain Doressoundiram, Sophie Gallé-Soas, Jean-Louis Hartenberger, Christophe Pichon, Jean-Sébastien Steyer, Christian Vettier

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
http://boutique.pourlascience.fr/

DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.
President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Prospérer dans l'ombre des dinosaures

Il est vraiment dommage que la machine à remonter le temps n'existe pas. Elle nous aurait permis d'obtenir des réponses rapides à une multitude de questions scientifiques et métaphysiques, et aurait probablement évité les guerres de religions et d'autres disputes en mettant tout le monde d'accord sur ce qui s'est réellement passé à tel ou tel moment de l'histoire.

Mais ne rêvons pas. Pour entrevoir le passé, la science ne dispose que des traces matérielles qu'il laisse – les fossiles pour les paléontologues. Leur découverte modifie parfois profondément la vision des choses. C'est ce qui s'est produit au cours des quinze dernières années avec la mise au jour, en divers sites, de remarquables fossiles de mammifères très anciens datant du Mésozoïque, l'ère des dinosaures.

Une nouvelle vision des mammifères anciens

Selon l'idée communément admise, les mammifères de cette époque étaient petits et peu nombreux, vivant une existence quasi clandestine dans l'ombre des grands reptiles. Or les nouveaux fossiles offrent un récit bien plus riche et passionnant. Ils montrent que, bien avant la fin des dinosaures liée à la chute d'un gros astéroïde, il y a 66 millions d'années, les mammifères constituaient déjà un groupe fort bien adapté et diversifié *(voir notre article pages 28 à 36)*.

La disparition des terribles dinosaures n'a fait que libérer le potentiel des mammifères, qui sont alors devenus l'un des groupes animaux les plus florissants. L'une de leurs espèces, la nôtre en l'occurrence, a même conquis et modifié la planète. Tant et si bien qu'on se demande parfois si elle ne prépare pas sa propre extinction. Et elle n'a pas besoin pour cela d'un astéroïde : les membres de cette espèce ont souvent un comportement étrange – par exemple, ce sont les seuls animaux capables de mourir et surtout de tuer pour des idées, aussi stupides soient-elles. ■

sommaire

3 Édito

Actualités

6 L'atmosphère s'est enrichie en oxygène plus tôt que prévu

7 Mots et tons : les chiens font la différence

8 Premiers Amérindiens : la voie Pacifique se confirme

10 Un robot souple comme un poulpe



12 Les plus vieilles traces de vie ?

14 La ronde rythmée du tournesol

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

16 Point de vue
L'éclairage au XXIe siècle : une approche globale est indispensable
Anne-Marie Ducroux

22 Homo sapiens informaticus
L'action, clé de l'apprentissage
Gilles Dowek

24 Cabinet de curiosités sociologiques
Excès de délicatesse
Gérald Bronner

26 Lu sur SciLogs.fr
Les marais et sites du sud de l'Iraq au patrimoine mondial de l'Unesco
Cécile Michel

Ce numéro comporte une encart abonnement broché et un encart abonnement jeté sur la diffusion kiosque France ainsi qu'un catalogue Sciences Belin déposé sur couverture sur une sélection d'abonnés France Métropolitaine.
En couverture : © James Gurney

À LA UNE

28 ÉVOLUTION
Le surprenant succès des mammifères au temps des dinosaures
Stephen Brusatte et Zhe-Xi Luo

On a longtemps cru qu'à l'époque des dinosaures, nos lointains parents mammifères étaient restés cantonnés à des formes de type musaraigne. En fait, pas du tout : de nouveaux fossiles racontent une histoire étonnamment plus complexe.



38 ASTRONOMIE
Un vol de sept ans pour quelques grammes d'astéroïde
Dante Lauretta

L'astéroïde Bennu est-il une menace réelle pour la Terre ? Pour le savoir et pour étudier ce corps céleste de près, la sonde spatiale OSIRIS-REx part à sa rencontre. Cette mission rapportera aussi quelques grammes de roche afin de mieux comprendre l'origine de la vie.



46 NEUROSCIENCES
Gélifier le cerveau pour mieux l'explorer
Karl Deisseroth

Grâce à une nouvelle approche à l'interface entre la chimie et la biologie, des neurobiologistes observent le million de milliards de connexions du cerveau, jusqu'aux plus profondément enfouies.

56 **DÉMOGRAPHIE**

Aux pays des épouses disparues

Christophe Z. Guilmoto

La préférence pour les garçons entraîne en Chine, en Inde et en Europe orientale un déséquilibre du *sex-ratio* à la naissance. Une véritable bombe à retardement démographique car, arrivés à l'âge du mariage, les hommes condamnés au célibat vont bientôt se compter par millions.



64 **PHYSIQUE**

L'énigme de la durée de vie du neutron

Geoffrey Greene et Peter Geltenbort

Plus de 8 secondes d'écart : les diverses mesures de la durée de vie moyenne du neutron conduisent à deux résultats discordants. Cette divergence résulte-t-elle de simples erreurs expérimentales ou traduit-elle un mystère plus profond ?



72 **HISTOIRE DES SCIENCES**

Einstein et la presse, une relation tumultueuse

Jean-Marc Ginoux et Christian Gérini

À partir de 1919, Einstein, devenu célèbre, intéresse plus que jamais les médias, notamment le *New York Times*. Il découvre alors leur pouvoir et leurs dangers...

Rendez-vous

78 Logique & calcul
Des indécidables à portée de main
Jean-Paul Delahaye

Les énoncés dont on ne peut prouver ni qu'ils sont vrais ni qu'ils sont faux semblent moins rares qu'on ne l'imaginait : on en a trouvé avec des problèmes portant sur de petites machines de Turing.

84 Science & fiction
Les parasites sont partout !
J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science
Tous les Chinois disent I love Yu
Loïc Mangin

89 Idées de physique
Quand la chaleur devient électricité
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



92 Question aux experts
L'art préhistorique a-t-il existé ?
Romain Pigeaud

94 Science & gastronomie
Des tuiles à ne pas rater
Hervé This

96 À lire

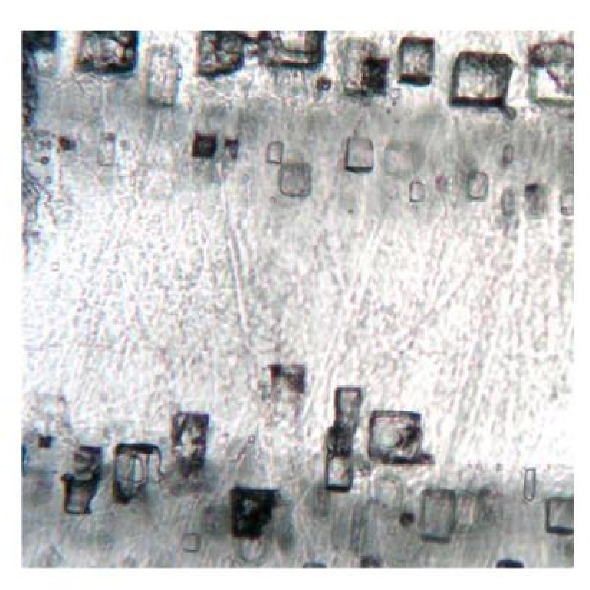
98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

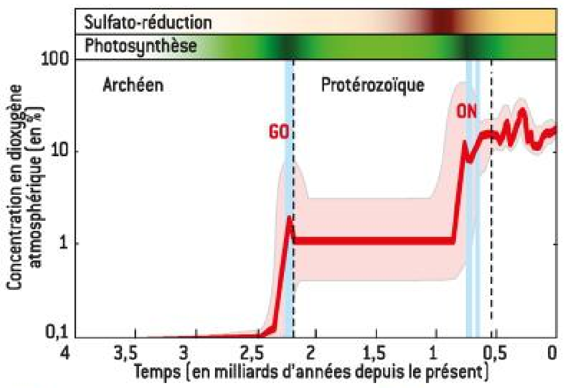
Actualités

Géosciences

L'atmosphère s'est enrichie en oxygène plus tôt que prévu

Selon la plupart des modèles, l'atmosphère terrestre serait restée relativement pauvre en oxygène jusqu'au début de l'ère cambrienne, il y a 500 millions d'années. L'analyse d'un échantillon d'air datant de 815 millions d'années semble montrer le contraire.





En se formant, les cristaux d'halite *(à gauche)* piègent des bulles et gardent ainsi en mémoire la composition de l'atmosphère de l'époque. Des analyses d'halite ancienne ont ainsi montré que, il y a 815 millions d'années, l'atmosphère était plus riche en oxygène qu'on ne le pensait.

Respirez profondément et sentez ce précieux mélange d'azote et d'oxygène emplir vos poumons. L'air, qui contient 20,9 % d'oxygène, n'a pourtant pas toujours été riche en ce gaz indispensable à la vie animale. Mais une nouvelle étude suggère une teneur déjà assez élevée il y a 815 millions d'années, bien plus tôt qu'on ne l'estimait.

De nombreux indices géologiques montrent que l'oxygène était absent de l'atmosphère durant les deux premiers milliards d'années de l'histoire de la Terre. Ce n'est qu'à la suite de la Grande oxygénation, événement survenu il y a environ 2,4 milliards d'années, que l'oxygène est apparu dans l'atmosphère, mais encore en très faibles quantités (moins de 1 %). Selon le modèle dominant, cette concentration aurait augmenté peu à peu au Protérozoïque (de 2,5 milliards à 541 millions d'années), pour grimper en flèche lors d'une seconde grande oxygénation qui se serait produite au Cambrien (de 541 à 385 millions d'années), en même temps que le développement de la vie pluricellulaire.

Mais l'explosion de la biodiversité cambrienne est-elle la cause ou le résultat de l'augmentation de la teneur en oxygène ? Une étude menée par une équipe internationale, dont fait partie Christophe Lécuyer, du Laboratoire de géologie de l'université de Lyon, penche pour le second scénario. En analysant un échantillon de l'atmosphère datant de 815 millions d'années, c'est-à-dire au Néoprotérozoïque, bien avant le Cambrien, les chercheurs ont découvert que la concentration en oxygène était déjà bien plus élevée qu'on ne le pensait.

La pierre de sel, que les géologues nomment halite, est une archive naturelle précieuse pour l'étude des environnements passés : en se formant à l'interface entre l'air et l'eau saumâtre, ces cristaux capturent de l'air dans des bulles, qui enregistrent ainsi la composition de l'atmosphère au moment de leur formation. Les chercheurs ont trouvé des fragments d'halite sous une couche de sédiments d'environ un kilomètre de profondeur dans le sud-ouest de l'Australie. Ils ont déterminé leur âge – approximativement 815 millions d'années – en datant les couches sédimentaires correspondantes.

Les chercheurs ont ensuite brisé les cristaux dans une chambre à vide pour libérer le contenu des bulles. Par spectrométrie de masse, ils ont déterminé la concentration en oxygène de cet air primitif. Le résultat est surprenant : ce dernier contient 10,9 % d'oxygène, soit 5 fois plus qu'on ne l'estimait habituellement pour l'atmosphère d'il y a 800 millions d'années.

Ces résultats suggèrent par conséquent que l'oxygène était déjà présent en quantité importante dans l'atmosphère (et donc dans l'océan) bien avant l'explosion de la vie pluricellulaire, à l'aube du Cambrien.

Par quel phénomène la concentration atmosphérique d'oxygène a-t-elle autant augmenté ? Parallèlement à cette étude sur l'halite, une équipe franco-brésilienne des universités de Sao Paulo et de Belém, de l'Institut de physique du globe à Paris et du laboratoire

Domaines océaniques de Brest, menée par Pierre Sans-Jofre, a mis en évidence le rôle indirect de bactéries exploitant le soufre dans l'augmentation de l'oxygène atmosphérique et océanique au Néoprotérozoïque.

En analysant les composés soufrés dans des sédiments (des pyrites et des sulfates), les chercheurs ont estimé que ces bactéries auraient été responsables d'une baisse de 50 % des sulfates dissous dans l'océan. Utilisant ces sulfates comme oxydant dans une respiration anaérobie (sans oxygène), ces bactéries n'auraient donc pas consommé l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques, et qui a ainsi pu enrichir l'atmosphère.

Ce phénomène de sulfatoréduction se serait produit au lendemain d'un événement majeur de l'histoire de la Terre, une glaciation de type « Terre boule de neige », une période où la planète a été entièrement couverte de glace. Selon Pierre Sans-Jofre et ses collègues, la déglaciation aurait conduit à un apport important de phosphate et de fer dans les océans. Ces éléments ont favorisé le développement massif d'algues qui ont alors consommé l'oxygène dissous dans l'eau. Appauvri en oxygène, le milieu est devenu plus favorable à des métabolismes associés à une respiration anaérobie, tels que celui des bactéries mises en évidence par les chercheurs.

Ces deux résultats se complètent et précisent ainsi les facteurs en jeu à une époque cruciale dans l'évolution de l'atmosphère terrestre.

William Rowe-Pirra

N. J. F. Blamey et al., Geology, vol. 44, pp. 651-654, 2016 ; P. Sans-Jofre et al., Nature Comm., vol. 7, article 12192, 2016

Neurosciences

Mots et tons : les chiens font la différence

Le meilleur ami de l'homme ne cesse de surprendre. Attila Andics, éthologue à l'université Loránd Eötvös de Budapest, et ses collègues ont montré que le cerveau du chien traite séparément le sens des mots et le ton employé. Or ces fonctions font appel, chacune, à un hémisphère différent du cerveau, une aptitude que l'on pensait peu répandue en dehors de l'espèce humaine. Le neurobiologiste Georges Chapouthier nous explique les implications de cette latéralisation des hémisphères cérébraux.

Que savait-on du traitement de la parole humaine par les chiens ?

Georges Chapouthier : Une idée très répandue est que les animaux, êtres émotionnels, sont capables de reconnaître les intonations mais pas la signification des mots. Or Attila Andics et son équipe ont montré que les chiens traitent séparément les données sémantiques et les données d'intonation. Ce que nous leur disons est analysé dans l'hémisphère gauche du cerveau alors que la façon dont nous le disons est analysée dans le cortex auditif de l'hémisphère droit.

Comment les chercheurs ont-ils établi ce résultat ?

G. C. : Ils ont travaillé avec treize chiens appartenant à quatre lignées différentes. Ils ont utilisé une technique d'imagerie cérébrale, l'IRM fonctionnelle, pour visualiser les régions de leur cerveau activées lors des expériences. Les expérimentateurs devaient soit dire des mots gentils (« bon chien », « bien joué »...) avec une voix enjouée ou neutre, soit dire des mots sans aucune signification pour le chien (« pourtant », « ainsi »...) sur les mêmes tons enjoués ou neutres. Lorsque les mots avaient un sens pour le chien, l'hémisphère gauche s'activait, et de même pour l'hémisphère droit lorsque l'intonation exprimait un sentiment.

En quoi ces travaux sont-ils novateurs ?

G. C. : Contrairement à des travaux antérieurs qui analysaient l'aptitude remarquable de certains chiens à connaître un grand nombre de mots, cette étude est la première à opposer la capacité des chiens à reconnaître les mots employés à celle de reconnaître les tons utilisés.



G. Chapouthier, directeur de recherche émérite CNRS

Elle montre ainsi que leur cerveau est latéralisé sur le plan fonctionnel, c'est-à-dire que les deux hémisphères ont des fonctions différentes.

Quelles sont les implications de cette découverte ?

G. C. : Que la latéralisation hémisphérique est un phénomène beaucoup plus répandu et ancien qu'on ne le croyait. Nous connaissons, en dehors des primates, très peu d'animaux dont les hémisphères cérébraux ont des fonctions différentes. C'est le cas de certains oiseaux avec leur chant (comme l'étourneau) et des rats, dans la perception des hormones. Cette étude suggère donc que la latéralisation des hémisphères est un phénomène qui pourrait être présent dans de nombreux groupes encore non étudiés. Dans le cas spécifique du langage, on peut penser que la capacité des deux hémisphères à traiter des informations différentes – hémisphère gauche pour les éléments analytiques et hémisphère droit pour les données émotionnelles – remonte au moins à l'ancêtre commun des chiens et des primates (il y a près de 125 millions d'années).

Quelles suites donner à cette étude ?

G. C. : Afin de mieux visualiser quelle région de l'hémisphère gauche s'active pour traiter la parole humaine, l'expérience gagnerait à être reconduite avec un groupe plus homogène de chiens. En effet, les sujets testés dans cette étude ont des caractéristiques diverses : mâles et femelles entre 1 et 12 ans, de quatre races différentes. Dans un second temps, il serait intéressant d'étudier d'autres espèces telles que les éléphants, les dauphins, les corbeaux...

Alice Maestracci

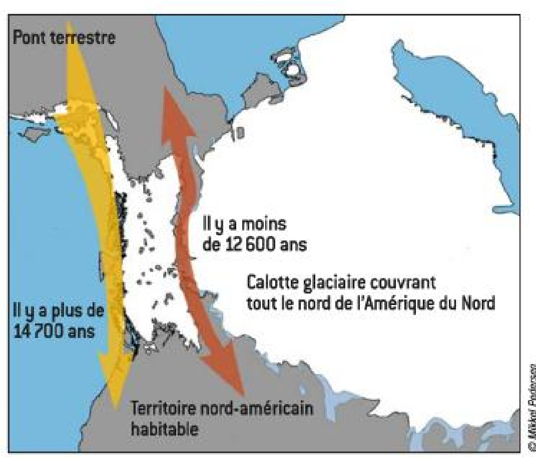
A. Andics et al., Science, vol. 353, pp. 1030-1032, 2016

Archéologie

Premiers Amérindiens : la voie Pacifique se confirme

Par où sont passés les premiers hommes arrivés en Amérique ? Une nouvelle étude révèle que l'ouverture du passage dans la calotte glaciaire est postérieure aux premières traces de cultures américaines. Ils sont donc passés ailleurs, probablement en longeant la côte ouest.





On pensait que les premiers colonisateurs des Amériques avaient traversé ce genre de paysage au pied des Rocheuses canadiennes. En fait, ils auraient plutôt longé la côte.

2200 ans au moins : c'est le laps de temps qui s'est écoulé entre l'arrivée des pionniers au nord de l'Amérique et l'ouverture d'un corridor terrestre au pied des Rocheuses canadiennes

Ils ne sont pas passés par l'intérieur des terres ! C'est la conclusion qui s'impose après une datation définitive de l'ouverture du « corridor terrestre » à travers les glaciers nord-américains, par lequel sont censés être passés les ancêtres de la population amérindienne après avoir traversé le pont terrestre qui reliait l'Asie et l'Amérique pendant la dernière glaciation.

Longtemps, aux États-Unis, a dominé la théorie *Clovis first*, selon laquelle les premiers Amérindiens appartenaient à la culture Clovis, dont les plus anciens vestiges datent de 13000 ans. Puis des traces d'occupation plus anciennes ont été découvertes…

Toutefois, l'un des piliers de la théorie *Clovis first* a subsisté : l'idée que les premiers chasseurs-cueilleurs sont parvenus dans le sud de l'Amérique du Nord en empruntant le corridor qui s'est ouvert au centre du Canada quand la calotte glaciaire recouvrant la région a enfin reculé.

C'est pourquoi une équipe dirigée par Eske Willerslev, de l'université de Copenhague, a entrepris de dater l'une des dernières régions du passage libéré par les glaces : le bassin de la rivière Peace. Durant l'hiver, ils ont extrait des sédiments des lacs de la région. Dans le cadre de son doctorat, Eske Willerslev avait démontré qu'il était possible d'y retrouver de l'ADN fossile. Les chercheurs ont donc extrait cet ADN. Ils l'ont ensuite séquencé par la technique dite du *shotgun*, qui produit de nombreuses séquences courtes d'ADN, à partir desquelles les espèces présentes dans l'environnement de l'époque peuvent être identifiées.

Il s'avère qu'une végétation steppique est apparue dans le bassin de la rivière Peace il y a seulement 12600 ans, rapidement suivie par des espèces telles que le bison, le mammouth, le lièvre et le campagnol, toutes à l'aise dans la steppe. Ce n'est que vers 11500 ans que s'est mis en place un écosystème forestier accueillant de grandes populations d'élans et toutes les espèces actuelles. Or les 1500 kilomètres du corridor canadien n'ont pu être traversés par des chasseurs-cueilleurs que s'ils pouvaient s'y nourrir. Pour les chercheurs, ce passage n'est vraisemblablement devenu « biologiquement possible » qu'après l'arrivée de la forêt et de son gibier, donc il y a nettement moins de 12600 ans.

Or cette date se situe 400 ans après le début de la culture Clovis. Elle est aussi postérieure de plusieurs milliers d'années aux cultures pré-Clovis. Alors, par où sont passés les premiers arrivants qui ont colonisé les Amériques ? L'hypothèse d'une migration le long de la côte ouest du Canada prise dans les glaces, avec une culture maritime et côtière comparable à celle des Inuits, est la plus probable à ce stade. Reste à la documenter par l'archéologie. Les chercheurs américains ont déjà commencé la chasse aux traces d'occupation humaine dans les milliers d'îles de la côte Pacifique, et déjà des indices apparaissent.

François Savatier

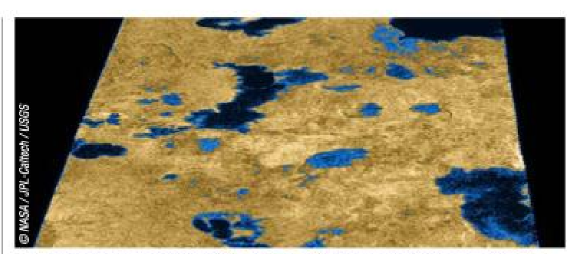
M. W. Pedersen et al., Nature, vol. 537, pp. 45-49, 2016

Chimie

Sur Titan, une chimie prébiotique sans eau ni oxygène ?

La chimie prébiotique décrit l'apparition des premières briques du vivant: acides aminés, sucres... Les conditions d'émergence que l'on considère pour de tels composés sont souvent celles d'une Terre primitive, chaude et riche en eau liquide. Néanmoins, l'étude de Titan, lune de Saturne, offre des pistes différentes pour l'apparition d'autres molécules prébiotiques. Son environnement est caractérisé par des températures basses et la présence de rivières et de précipitations composées de méthane et d'éthane.

En 2015, des chercheurs ont montré que des membranes stables, préfigurant des parois cellulaires, peuvent se former dans ces hydrocarbures. À présent, l'équipe de Martin Rahm, de l'université Cornell aux États-Unis, suggère que les molécules de type polyimines, sans doute abondantes sur Titan, joueraient un rôle similaire à celui de biomolécules terrestres.



© NASA / JPL-Caltech / USGS

Le radar de la sonde *Cassini* a mis en évidence des lacs de méthane liquide à la surface de Titan. Hébergent-ils une chimie complexe ?

Les polyimines sont des polymères dont l'unité de base est l'acide cyanhydrique, HCN. À basse température, les calculs montrent qu'ils adoptent de nombreuses configurations tridimensionnelles stables (en forme d'hélice, de vagues ou de structures planes susceptibles de s'empiler).

La structure et les propriétés électroniques de certaines de ces configurations rappellent celles des protéines. Plus étonnant, les formes planes absorbent la lumière de même longueur d'onde que celle qui arrive à la surface de Titan, assurant la conversion d'énergie électromagnétique en énergie chimique, comme pour la photosynthèse sur Terre.

Selon les auteurs de cette étude, si l'existence d'une vie sur Titan fondée sur les polyimines reste hypothétique, une autre chimie complexe et éventuellement prébiotique peut être à l'œuvre sur des systèmes planétaires froids et, à première vue, stériles.

Martin Tiano

PNAS, vol. 113, pp. 8121-8126, 2016

La mouche en chute libre

Quand nous sautons dans le vide ou utilisons un ascenseur, nous ressentons l'accélération et la pesanteur, grâce aux petits capteurs situés dans notre oreille interne. Mais qu'en est-il chez les insectes volants ? Roman Goulard, Jean-Louis Vercher et Stéphane Viollet, du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille, ont découvert que pour détecter qu'elles sont en chute libre, les mouches s'appuient principalement sur leur vision et non sur une éventuelle perception de la gravité.

Pour le mettre en évidence, les chercheurs ont développé un dispositif expérimental permettant de placer des insectes en chute libre. Avec de la lumière et des repères visuels, les mouches compensent leur chute, mais pas dans l'obscurité totale. La vision semble donc jouer un rôle important.

De précédentes études suggéraient que les mouches exploitaient le flux d'air, mais cette information semble insuffisante : dans le noir complet, elles se crashent dans la plupart des cas.

Biomédecine

Pourquoi les métastases adoptent les poumons

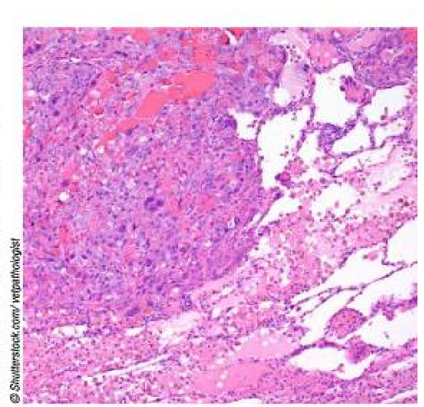
Les poumons sont des champions de la maîtrise de soi. Avec leurs 70 mètres carrés de surface en contact avec l'extérieur chez un humain adulte, ils sont confrontés à une multitude d'agents étrangers sans que leur système immunitaire ne s'affole pour autant. Toutefois, cette faculté se retourne contre eux. David Clever, de l'Institut américain du cancer, à Bethesda, et ses collègues ont découvert que le mécanisme qui empêche le système immunitaire des poumons de s'emballer à chaque inspiration y favorise aussi l'installation de métastases.

Un élément clé de ce mécanisme est l'oxygène inhalé, et plus précisément, une famille de protéines sensibles à l'oxygène, les enzymes PHD. En comparant les réponses immunitaires de souris ne produisant pas les enzymes PHD et de souris normales, les biologistes ont montré que ces protéines limitent l'inflammation des poumons en présence d'agents étrangers anodins. Or une cellule cancéreuse s'infiltrant dans un nouvel organe en arborant à sa surface des molécules mutées, inconnues du système immunitaire, ressemble à un agent étranger. Obtiendrait-on le même effet ? Les biologistes ont donc reproduit l'expérience en injectant une tumeur aux souris par voie intraveineuse. Et de fait, la tumeur a moins souvent colonisé les poumons des souris sans enzymes PHD que ceux des souris normales. En d'autres termes, les enzymes PHD créent un environnement propice à la colonisation des poumons par des métastases.

Les métastases causent plus de 90 % des décès dus au cancer. Jusqu'à présent, les chercheurs se sont surtout intéressés aux caractéristiques des cellules métastatiques. Ces travaux rappellent que celles des lieux que ces cellules colonisent sont tout aussi importantes dans la lutte contre le cancer.

Marie-Neige Cordonnier

Cell, vol. 166, pp. 1117-1131, 2016



© Shutterstock.com/ vetpathologist

Souvent, des métastases issues de tumeurs provenant d'autres organes s'installent dans les poumons, où elles développent une tumeur, telle la masse de cellules ci-dessus à gauche.

Bon goût à l'âge du Bronze

Quel homme de goût! Même un dandy parisien aurait du mal à s'habiller ainsi : grâce à l'ADN mitochondrial retrouvé dans les cuirs de l'attirail d'Ötzi, l'homme des glaces, Niall O'Sullivan, de l'Institut pour les momies et l'homme des glaces, à Bolzano, vient de montrer que le chapeau d'Ötzi est en fourrure d'ours, son carquois et son sac en peau de chevreuil, sa ceinture en veau, son cache-sexe en peau de mouton et ses jambières en peau de chèvre. Quant à sa grande veste, elle se compose à la fois de cuir de mouton et de cuir de chèvre.

Froid et floraison

On sait depuis longtemps que le froid est responsable du déclenchement de la floraison par un phénomène nommé vernalisation. En 2009, l'équipe de Caroline Dean, du John Innes Centre, à Norwich, en Angleterre, avait mis en évidence le gène impliqué, *Flowering Locus C* (FLC), et le fait qu'il est inactivé par la protéine Vin3 pour permettre la floraison. Récemment, la même équipe a découvert qu'une autre protéine, Val1, reconnaît la séquence du gène FLC et modifie la conformation de l'ADN, une étape indispensable pour que Vin3 passe à l'action.

Double transit planétaire

Le système TRAPPIST-1 héberge trois planètes. Lors de leur découverte, il n'avait pas été possible de déterminer si TRAPPIST-1B et -1C, classées comme super-Terres du fait de leurs tailles légèrement supérieures à celle de notre planète, étaient des planètes gazeuses ou telluriques. L'observation par le télescope spatial *Hubble* d'un événement rare, le passage des deux planètes presque en même temps devant leur étoile, a permis de répondre à la question. Les variations du spectre durant ce double transit étaient faibles, ce qui suggère des atmosphères peu étendues, donc des planètes telluriques.

Médecine

Rétines artificielles : on y voit plus clair



© Shutterstock.com/Jane Kelly

À travers le monde, 45 millions de personnes souffrent de cécité. Pour celles dont seule la rétine est touchée, retrouver la vue pourrait devenir une réalité grâce aux prothèses rétiniennes. Développées depuis une dizaine d'années, elles permettent aux patients implantés de percevoir des signaux lumineux sous forme de taches, les phosphènes.

Une prothèse rétinienne se compose d'une caméra, fixée sur une paire de lunettes, d'un système électronique qui convertit l'image de la caméra en signal électrique et d'une matrice de microélectrodes qui stimulent les neurones de la rétine. Mais l'image restituée est loin d'être nette et précise. Sébastien Roux, du CNRS et de l'université Aix-Marseille, et son équipe ont identifié un effet qui limite la qualité de l'image. Grâce à une technique d'imagerie optique, ils ont comparé l'activité nerveuse du cortex visuel de 35 rongeurs en réponse à des stimuli visuels naturels, d'une part, et électriques, d'autre part.

Les résultats montrent que, bien que la prothèse stimule le cortex visuel du rongeur au bon endroit et avec la bonne intensité, la zone activée est trop grande et de forme allongée. Cette anomalie de forme et de taille s'expliquerait par la stimulation accidentelle de cellules nerveuses situées dans le voisinage de celles à activer.

Sébastien Roux et ses collègues ont alors montré qu'en apportant des modifications appropriées aux stimulations électriques du dispositif, ils limitent l'activation des neurones non concernés et améliorent ainsi la performance des prothèses rétiniennes.

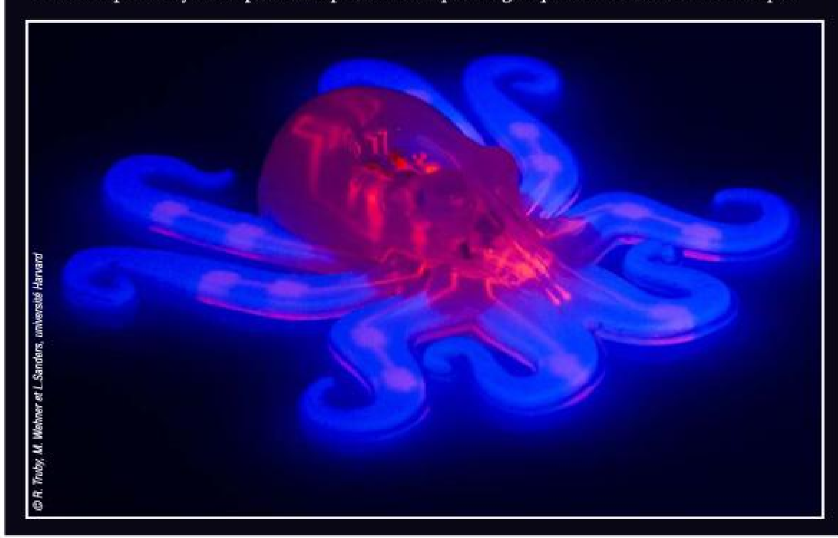
A. M.

S. Roux et al., eLIFE, en ligne le 23 août 2016

Insolite

Un robot souple comme un poulpe

Les robots souples sont plus robustes et s'adaptent mieux aux environnements naturels que les robots construits avec des matériaux rigides. Cependant, leur conception se heurte au besoin de les alimenter avec une batterie et des fils électriques. Jennifer Lewis, de l'université Harvard, et ses collègues ont conçu un « octobot » dont les tentacules sont actionnés par un système pneumatique, alimenté par du gaz qu'émet une réaction chimique.



© R. Truby, M. Wehner et L.Sanders, université Harvard

Archéologie

Un curieux cimetière humain-canin sous le zoo de Lima

Karina Venegas Gutiérrez, de l'université nationale de San Marcos, à Lima, vient d'étudier un curieux cimetière de chiens découvert sous le zoo de la capitale péruvienne – une ville largement construite sur des couches archéologiques plurimillénaires.

La fouille a vite révélé qu'il s'agissait en fait d'un cimetière humain aussi. Les archéologues ont mis au jour les squelettes de 126 individus et ceux de 128 chiens. Ces canidés sont de toutes les tailles. Certains ont été momifiés naturellement, de sorte qu'on les retrouve avec leurs poils, truffes et oreilles. Les céramiques et les autres objets exhumés dans les mêmes strates suggèrent que le cimetière daterait de 1000 ans.

L'état des squelettes humains livre un indice sur l'origine de cette nécropole: les défunts sont tous morts à un âge compris entre 20 et 40 ans avec des côtes cassées, des crânes fracturés et des membres brisés. Ces graves lésions osseuses n'ont pas eu le temps de cicatriser; elles semblent s'être produites peu avant la mort et ont très vraisemblablement été fatales. Les squelettes des chiens, en revanche, sont intacts.

Selon Karina Venegas Gutiérrez, l'interprétation la plus vraisemblable de ces constatations serait que les chiens ont fait partie d'un rituel sacrificiel accompagnant une inhumation en masse au sein d'un groupe qui a subi une attaque massive.



Les momies et squelettes trouvés à Lima renseignent les archéologues sur les chiens qui y vivaient il y a un millier d'années. Grands ou petits, ils se révèlent semblables aux chiens errants d'aujourd'hui.

La date de cette inhumation coïncide avec une transition notable au sein des sociétés côtières du Pérou: le remplacement de la culture Lima, qui occupait la région entre les années 800 et 900 de notre ère, par la culture Ichma, à laquelle on attribue habituellement la période allant de 900 à 1470.

F. S.

L. Wade, Science, en ligne le 19 août 2016

Zoologie

Nos frères les Dermoptères

L'énigme de la parenté des Dermoptères (ou lémurs volants, ou colugos), des petits mammifères capables de planer grâce à une membrane, vient de trouver une réponse : ils forment un groupe frère des primates, et leur diversité serait plus importante qu'on ne le pensait.

Équipés d'une membrane s'étendant entre les pattes, ces petits mammifères nocturnes et arboricoles d'Asie du Sud-Est sont capables de planer sur plus de 140 mètres et ne foulent presque jamais le sol. Pendant près d'un siècle, les biologistes ont débattu de leur parenté. Certains les ont rapprochés des Scandentiens, de petits mammifères arboricoles à longue queue, mais le doute persistait. Il faut dire que leur mode de vie nocturne et arboricole et leur capacité à planer les rendent difficiles à observer. Dans une nouvelle étude, William Murphy, de l'université Texas A&M, aux États-Unis, et ses collègues ont analysé leur génome à partir d'un individu javanais et de spécimens conservés dans des musées. Ils ont ainsi montré que les Dermoptères seraient plutôt un groupe frère des primates (les singes et les humains), et qu'il y en aurait environ quatorze espèces, et non deux.

W. R.-P.

V. Mason et al., Science Advances, en ligne le 10 août 2016



Les Dermoptères, ou colugos, sont des mammifères arboricoles nocturnes capables de planer sur plus d'une centaine de mètres.

Astronomie

L'exoplanète la plus proche

Des dizaines de nouvelles exoplanètes sont découvertes chaque année, mais elles se situent souvent très loin, trop pour qu'on puisse les observer directement. La situation vient de changer : une équipe de chercheurs, dont Julien Morin, du laboratoire Univers et particules, à Montpellier, a déniché une exoplanète autour de l'étoile la plus proche du Système solaire, Proxima du Centaure, à « seulement » 4,2 années-lumière, soit environ 40 000 milliards de kilomètres !

À quoi ressemble-t-elle ? Sa masse, estimée à 1,3 fois celle de la Terre, indique qu'il s'agit d'une planète rocheuse. Elle est en orbite à seulement 7 millions de kilomètres de son étoile. Le rayonnement de Proxima du Centaure étant plus faible que celui du Soleil, la planète se trouve tout de même dans la zone dite habitable, où la température est assez clémente pour que de l'eau liquide puisse subsister à sa surface.

W. R.-P.

G. Anglada-Escudé et al., Nature, vol. 536, pp. 437-440, 2016

Paléobiologie

Les plus vieilles traces de vie ?

Depuis quand la vie existe-t-elle ? A-t-elle débuté sur Terre ? Ailleurs ? Pour répondre, il importe de dater la présence de la vie sur la planète. Il était donc logique de rechercher des indices biotiques dans les plus anciennes roches terrestres connues. C'est ce qu'a fait l'équipe d'Allen Nutman, de l'université de Wollongong, en Australie.

Ces chercheurs ont étendu la quête aux roches métamorphiques de la formation d'Isua, au Groenland, qui datent de l'Éoarchéen (entre 4 et 3,6 milliards d'années). Jusqu'à présent, les recherches de traces de vie ancienne se limitaient à des roches sédimentaires non métamorphisées, car les roches ayant séjourné en profondeur (donc métamorphiques) passaient pour être trop altérées.

Or l'équipe d'Allen Nutman a tout de même trouvé une possible trace de vie datant de 3,7 milliards d'années dans une roche métamorphique de la formation d'Isua. Elle consiste en une série de cônes en calcaire finement stratifié définissant des espaces intermédiaires remplis de ce qui ressemble à du sable aggloméré. De telles structures évoquent des stromatolithes, de petits monticules calcaires formés dans les eaux marines peu profondes par les cyanobactéries, tels ceux qu'on observe aujourd'hui à Shark Bay, en Australie.

Dans la structure groenlandaise, la proximité entre deux roches différentes (sable et calcaire) exclut qu'il puisse s'agir simplement de couches rocheuses plissées par des pressions géologiques. Les chercheurs ont aussi constaté que les concentrations en titane et en potassium dans les structures sont supérieures à celles du sable intercalaire ; cela prouve qu'un sédiment différent du calcaire s'est accumulé entre les cônes. Bref, il semble qu'il y a environ 3,7 milliards d'années, une tempête ou un autre phénomène a accumulé du sable entre des stromatolithes en train de se former au fond d'une mer peu profonde.

Il est malheureusement difficile d'en être absolument sûr, car il existe dans la nature des structures ressemblant à des stromatolithes, mais d'origine non biologique. S'il se confirmait que l'équipe d'Allen Nutman a raison, les implications pour l'histoire de la vie seraient importantes. D'une part, la date d'apparition de cette dernière serait reculée de plus de 220 millions d'années, car les plus anciennes traces de vie faisant consensus datent de 3,48 milliards d'années. D'autre part, il y a 3,7 milliards d'années, la surface terrestre était encore en train d'être bombardée par des astéroïdes et d'évoluer vers sa forme actuelle. Si la vie existait déjà dans cet enfer, alors les efforts de la Nasa pour la déceler sur Mars seraient encore plus justifiés…

F. S.

Nature, en ligne le 31 août 2016



Ces structures coniques rousses étaient peut-être des stromatolithes, c'est-à-dire des monticules calcaires que les populations de cyanobactéries érigent dans des eaux marines peu profondes.

Géophysique

Rivières contre collines

Avez-vous déjà agité une corde à la surface du sable ? Petit à petit, ses battements aplanissent les bosses. C'est en quelque sorte le mécanisme qu'Aaron Bufe, Chris Paola et Douglas Burbank, de l'université de Californie à Santa Barbara et de celle du Minnesota, ont étudié à l'aide d'une table expérimentale, pour décrire comment les rivières dévalant des monts Tian ont nivelé la marge nord du bassin du Tarim, en Chine.

Au lieu de frapper les bosses telle la corde, les rivières scient les collines en se déplaçant. Leurs sédiments tendent en effet à se déposer là où le flux est lent, donc près des parois intérieures de leurs coudes, de sorte que les eaux circulent vite contre les parois extérieures et les usent. Résultat : cela nivelle les collines, ce qui étonnait les chercheurs, car dans le bassin du Tarim, la tectonique tend à les élever très vite.

F. S.

A. Bufe et al., Nature Geoscience, en ligne le 8 août 2016

Évolution

À quoi sert l'orgasme féminin ?

L'intérêt reproductif de l'orgasme féminin est moins évident que celui de son homologue masculin, qui propulse les gamètes mâles jusqu'à destination. Mihaela Pavličev, de l'université de Cincinnati, et son collègue ont proposé une nouvelle hypothèse pour expliquer son apparition. Ils ont constaté que chez d'autres espèces de mammifères, le coït déclenche chez la femelle des décharges hormonales similaires à celles qui se produisent lors de l'orgasme humain, et que ces décharges sont impliquées dans l'ovulation. Le rôle initial de l'orgasme dans notre espèce aurait alors été de provoquer cette dernière. L'ovulation s'en serait déconnectée par la suite, le transformant en une sorte de vestige évolutif.

Cela ne signifie pas que l'orgasme féminin ne sert à rien : il pourrait avoir subsisté en assurant d'autres fonctions, telles que le renforcement des liens avec le partenaire. De tels recyclages ne sont pas rares dans l'évolution et les auteurs de l'étude citent l'exemple des plumes, qui servaient initialement à la régulation de la chaleur corporelle des dinosaures et qui leur ont plus tard permis de s'élever dans les airs.

Guillaume Jacquemont

M. Pavličev et G. Wagner, J. Exp. Zool., en ligne le 31 juillet 2016

Biologie végétale

La ronde rythmée du tournesol

Les tournesols suivent le Soleil tout au long de la journée, comme pour ne pas manquer le moindre de ses rayons. Puis la nuit, les plantes se retournent à nouveau pour faire face à l'est le matin suivant. Mais comment ce phénomène, appelé héliotropisme, se produit-il ? Stacey Harmer, de l'université de Californie à Davis, et ses collègues ont montré qu'il est dû à un équilibre de facteurs de croissance, régulé par la lumière mais aussi par le cycle circadien des plantes.

Contrairement à une idée reçue, les tournesols ne suivent pas le Soleil toute leur vie, mais seulement pendant leur développement. Cela résulte d'une croissance asymétrique entre les deux côtés de la tige, due à une hormone de croissance végétale, l'auxine, qui est transportée vers la partie ombragée de la tige lorsque de la lumière est détectée par des molécules photoréceptrices. Ainsi, le côté de la plante opposé à la lumière pousse plus vite, ce qui oriente sa fleur vers le Soleil. La nuit, l'auxine s'accumule du côté ouest de la tige, si bien que la fleur s'oriente vers l'est.

Si l'on comprend la dynamique de l'auxine le jour, pourquoi s'accumule-t-elle d'un seul côté de la tige la nuit, en l'absence d'une influence lumineuse ?

Pour tenter de répondre, l'équipe de Stacey Harmer a effectué plusieurs expériences : en éclairant les plantes avec une source de lumière fixe, ou en changeant artificiellement la durée d'une journée. Dans les deux cas, le mouvement des tournesols était perturbé. Les chercheurs ont conclu que l'héliotropisme de ces plantes est en partie réglé par un rythme circadien, c'est-à-dire une horloge interne qui régule les activités par périodes de 24 heures environ.

W. R.-P.

H. Atamian et al., Science, vol. 353, pp. 587-590, 2016



Pendant leur croissance, les tournesols suivent la course du Soleil tout au long de la journée et profitent ainsi au mieux de son rayonnement.

La particule du LHC était un mirage

En décembre 2015, les physiciens des expériences ATLAS et CMS du LHC (le grand collisionneur de hadrons du Cern) ont annoncé avoir observé des indices de l'existence d'une particule inconnue d'une masse de 750 gigaélectronvolts. La quantité de données était alors insuffisante pour conclure à la réalité de ce signal. Depuis, les chercheurs ont montré que ce dernier correspondait à une fluctuation statistique. Une déception qui n'entame pas l'espoir de découvrir de nouvelles particules au LHC.

Rosetta a retrouvé Philae

Le 2 septembre dernier, *Rosetta* photographiait la surface de la comète Tchouri avec une résolution de 5 centimètres par pixel. Sur l'une des images, les chercheurs ont enfin retrouvé l'atterrisseur *Philae*, coincé dans une crevasse. Ce dernier, largué par *Rosetta* en novembre 2014, avait connu un atterrissage mouvementé. Il avait rebondi plusieurs fois et terminé sa course dans une zone d'ombre non identifiée. Malgré cela, les chercheurs avaient communiqué un peu avec *Philae* et récupéré quelques données scientifiques. Localiser le robot permet de mieux connaître l'environnement auxquelles elles correspondent.



POINT DE VUE

L'éclairage au XXIe siècle : une approche globale est indispensable

Une politique publique de l'éclairage est nécessaire car, des décennies après les premières alertes, elle n'existe toujours pas. De nombreux impacts ne sont ni renseignés ni pris en compte, alors que se multiplient les études attestant d'effets de la lumière artificielle nocturne sur la santé humaine et sur l'environnement naturel.

Anne-Marie DUCROUX

L'éclairage a apporté confort et sécurité appréciables, et étendu considérablement les activités humaines la nuit. Cependant, depuis quelques décennies, la lumière ne répond plus seulement à des besoins avérés de sécurité, mais à des emplois bien différents et résulte souvent de choix orientés par l'offre des fabricants et installateurs.

En France, la « politique » de la lumière semble déléguée sans limite au marché, et l'État n'a fixé aucun objectif national de réduction des émissions lumineuses pour diminuer leurs impacts négatifs, comme il sait pourtant le faire pour les politiques du climat ou de l'énergie. Il n'exerce à peu près aucune régulation.

Du côté des communes, les choix d'éclairage public se sont longtemps résumés au prix des équipements, à leur photométrie ou à leur esthétique. Avec des informations surtout techniques, les élus ont trop abandonné leur rôle consistant à fixer des objectifs politiques dans la commande de l'éclairage. Résultat : depuis les années 1990, la lumière émise chaque année par le seul éclairage public a augmenté de 94 %, et le nombre de points lumineux de 89 %. Aux 11 millions de points lumineux d'éclairage public, il convient d'ajouter 3,5 millions d'enseignes lumineuses au moins, des publicités lumineuses toujours plus nombreuses, des canons à lumière et signalétiques lumineuses, les événements à base de lumière qui se multiplient, des éclairages de bâtiments ou façades toute l'année...

La pollution lumineuse, visible désormais partout en halos lumineux et crépuscule permanent, transforme des cieux sombres et étoilés en cieux jaunes et déserts, en lumières intrusives ; elle s'étend en milieu urbain comme rural, entraînant coûts et effets pluriels, pour tous.

Les investissements des élus se font sans recul sur la dernière technologie, sans information indépendante, sans vision d'ensemble des enjeux

Les communes qui rénovent ou changent leur éclairage public peuvent sans le savoir faire de mauvais choix. En effet, les fabricants et les vendeurs incitent toujours à changer de matériel, mais beaucoup plus rarement à étudier les besoins réels et suffisants ou à revoir les usages de la lumière. Pourtant, cela constitue la première mesure simple et sans coût, la première source de réduction de lumière inutile, les économies d'énergie générées allant de 25 à 75 %. De plus, leur conception de l'éclairage procède d'une vision exclusivement anthropique, où des impacts négatifs de l'éclairage nocturne sont négligés, voire niés. Orientés aussi par des politiques publiques trop sectorielles, et la consommation électrique de l'éclairage public ayant augmenté de 40 %, les élus sont encore incités à tort à des approches partielles, comme celle de la seule performance énergétique.

Les élus investissent des sommes considérables dans l'éclairage public (600 millions d'euros en 2014 en France) sans vision d'ensemble des enjeux, sans recul sur la dernière technologie proposée (en général les LED à forte composante de lumière blanche), sans disposer d'information indépendante des intérêts des vendeurs et fabricants, sans examen suffisant des autres caractéristiques des sources lumineuses (quantité de lumière émise, orientation, durée de vie réelle, distribution spectrale). Ainsi, les communes cherchant à limiter la consommation énergétique peuvent confondre aisément énergie et lumière. Certaines choisissent par exemple des sources plus énergétiquement efficaces... mais augmentent leur nombre ou ne diminuent pas la



© Shutterstock.com/EnolaBrain81

puissance installée d'éclairages à meilleur rendement lumineux. Au total, en visant les seules économies d'énergie, on émet toujours plus de lumière la nuit !

Un lobby organisé passe notamment par des normes non obligatoires, présentées comme une règle, visant à standardiser, alors que des réponses sur mesure, adaptées aux vrais besoins d'un territoire définis avec précision par ses habitants et les élus seraient pertinentes. Par ailleurs, il n'est pas fourni aux élus d'analyse globale des impacts ou des coûts incluant investissements, distribution, fonctionnement, maintenance et gestion de fin de vie.

D'autres enjeux liés à l'éclairage public ne sont tout simplement pas documentés en France, comme le bilan climatique global de l'éclairage, lors de ces différentes phases. L'analyse de cycle de vie complet par lampe et matériel n'est pas non plus fournie et la croissance des points lumineux a pour corollaire plus de matières premières consommées, plus de terres rares importées (dont les gisements sont pour la plupart en Chine), plus de déchets à collecter... alors que la collecte des LED ne dépassait pas 1 %, pour 37 millions de LED mises sur le marché en 2014.

CHAQUE LAMPADAIRE TUE environ 150 insectes par nuit d'été, selon une étude de chercheurs allemands publiée en 2011. Pour la France, cela signifie plusieurs milliards d'insectes tués chaque année. Un impact parmi d'autres de l'éclairage public...

■ L'AUTEURE



© Régis Fialaire

Anne-Marie DUCROUX, consultante indépendante, est présidente de l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN) depuis 2010.

L'impact de la lumière nocturne sur le sommeil et la santé humaine reste également un angle mort des politiques publiques de santé. La vie s'est construite sur un rythme naturel où alternent jour et nuit. Or nous vivons moins exposés à la lumière solaire le jour et de plus en plus à une lumière permanente la nuit.

Beaucoup d'études montrent un dérèglement de l'horloge circadienne qui altère des fonctions physiologiques majeures, dont le sommeil. De plus, l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) formulait dès 2010 des alertes sanitaires sérieuses quant aux effets des LED sur la vision.

Depuis, ces sources lumineuses sont installées massivement en usage domestique et extérieur. Un individu sera désormais exposé aux LED dès sa chambre d'enfant, à tous les âges de sa vie, chez lui, à son travail et dans l'espace public. La question de notre

exposition à leur lumière tout au long de la vie, ou exposome, devrait être particulièrement documentée, et pourtant aucune étude épidémiologique d'ampleur n'est menée.

L'impact de la lumière sur la biodiversité et les paysages est aussi un enjeu orphelin depuis des années, malgré la quantité d'études scientifiques existantes qui le documentent. On sait que 28 % des espèces de vertébrés et 64 % des invertébrés vivent partiellement ou totalement la nuit, et toute la biodiversité diurne a besoin d'une alternance marquée du jour et de la nuit. Déplacements, migrations, alimentation, reproduction... : nombre d'activités essentielles à la vie sont nocturnes.

Alors qu'on réalise des inventaires de biodiversité locale, qu'on instaure des « trames » vertes et bleues pour permettre des continuités écologiques ou des schémas de cohérence écologique, on ignore la lumière artificielle émise chaque nuit.

Des espèces perturbées, des milieux fragmentés

Cinq années d'actions et de publications originales de l'ANPCEN ont permis de montrer, sur la base d'études scientifiques internationales recensées, que la lumière a des effets spécifiques par groupes d'espèces et qu'elle fragmente et transforme les paysages.

Ainsi, les dates de débourrement ou de chute des feuilles sont modifiées par un éclairage constant ; les poissons sont désorientés dans leurs migrations ; des oiseaux tournoient sans fin dans les rais de canons de lumière orientés vers le ciel, ou chantent en pleine nuit trop claire croyant qu'il s'agit de l'aube ; les tortues marines venant d'éclore sont attirées par les lumières littorales au lieu de se diriger vers la mer ; plusieurs milliards d'insectes meurent chaque nuit d'été en France parce qu'ils sont attirés par les lampadaires ; des pollinisateurs sont plus exposés aux prédateurs...

La lumière, par exemple celle d'une route éclairée, peut être aussi infranchissable que des barrières terrestres et réduit la connectivité des écosystèmes. Les paysages, eux, diffèrent de jour et de nuit dans leur structure, leurs interactions et notre perception. Pourtant, ils sont décrits implicitement de manière spatiale et souvent diurne. Or pour une gestion adéquate, leurs spécificités temporelles doivent être comprises.

La pression de l'éclairage nocturne s'ajoute à toutes celles qui érodent déjà la biodiversité, mais la loi de 1976 sur la nature était totalement muette sur cet aspect. Grâce à l'action de l'ANPCEN et son suivi législatif pendant deux ans, la loi de 2016 reconnaît enfin les paysages nocturnes comme patrimoine commun de la nation, affirme le devoir pour tous de protéger l'environnement nocturne et souligne la nécessité de prendre en compte la gestion de la lumière dans les continuités écologiques terrestres et aquatiques et les nuisances lumineuses dans la qualité des paysages.

Cette étape majeure devrait aider à sortir des approches énergétiques trop sectorielles. L'ANPCEN a par ailleurs publié des contributions pour l'État, des recommandations originales d'usages et d'éclairages moins néfastes par groupes d'espèces, des conseils aux élus de contrats ou marchés permettant une commande plus globale ou aux fabricants d'une conception incluant tous les enjeux de la lumière du XXI[e] siècle...

Disposant de suffisamment de connaissances et d'outils, les décideurs publics nationaux et locaux peuvent jouer positivement leur rôle de régulateur. L'ignorance n'est plus un argument valide. Il est temps de se fixer des limites, de repenser l'éclairage en coûts et impacts globaux, de lancer des études épidémiologiques et des recherches, de contrôler les autoallégations écologiques de matériels, de construire une information expertisée et indépendante, d'appliquer là où on ne sait pas le principe de précaution, de fixer des objectifs et de suivre les évolutions comme pour d'autres politiques publiques. ■


ANPCEN

DES ARBRES INUTILEMENT ÉCLAIRÉS dans une rue déserte.

■ SUR LE WEB

Le site de l'ANPCEN (www.anpcen.fr) fournit des informations sur les questions d'éclairage, notamment :
- **Éclairage du XXI[e] siècle et biodiversité**, étude MEB-ANPCEN : https://lc.cx/ooPF
- **Éclairage et loi biodiversité** : https://lc.cx/ooPt
- **Éclairage et loi de transition énergétique** : https://lc.cx/ooW4
- **Éclairage et climat** : https://lc.cx/ZuQX
- **Éclairage et état de la qualité de la nuit en France** : https://lc.cx/ZneB
- **Éclairage et normalisation** : https://lc.cx/oJdi

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr


CREATIVE
AWARDS
2016
by SAXOPRINT
Grand Prix du Jury des Creative Awards 2016, un concours organisé avec le soutien de l'imprimeur
#FishForward
WWF France, SIREN n° 302518667, SAXOPRINT EURL, RCS : NANTERRE 501516645


en ligne

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



L'action, clé de l'apprentissage

La pédagogie haptique rend l'élève acteur de son enseignement. Il serait alors plus réceptif aux connaissances qu'on veut lui transmettre.

Un sens, en neurophysiologie, est un dispositif qui capte des stimuli – lumière, son, etc. – et les traduit en influx nerveux utilisables par le cerveau. Les différents stimuli définissent les divers sens : la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher, auxquels nous ajoutons parfois la perception du champ de gravité, ou celle de la position et du mouvement des différentes parties de notre propre corps.

En informatique, les dispositifs tels que caméra, microphone ou clavier, qui captent des informations et les traduisent sous une forme utilisable par un processeur sont les périphériques d'entrée. Ils s'opposent aux périphériques de sortie – écrans, haut-parleurs, moteurs... – qui véhiculent de l'information dans l'autre sens. En quelque sorte, les périphériques d'entrée sont donc aux ordinateurs ce que les sens sont au corps. Nous pouvons même rapprocher certains périphériques de certains sens : la caméra à la vue ou le microphone à l'ouïe.

Les informaticiens et les roboticiens essaient de construire d'autres périphériques, qui permettent de sentir, goûter et toucher. Les tentatives pour construire des périphériques permettant de toucher se heurtent cependant à une difficulté, due semble-t-il à une particularité de ce sens : s'il est possible de voir ou d'entendre sans bouger, il est difficile de toucher sans bouger, car une main immobile posée sur un objet en capte très peu d'information. Il est, en particulier, nécessaire de la bouger pour percevoir la texture de l'objet et distinguer le papier de soie du papier de verre, par exemple. Le toucher n'est donc pas un simple périphérique d'entrée ; c'est un système plus complexe, formé d'un périphérique de sortie, qui déplace la main, et d'un périphérique d'entrée, qui capte les stimuli produits, non par l'objet lui-même, mais par le mouvement de la main sur l'objet. Un tel sens, qui perçoit en agissant, est qualifié d'haptique, adjectif forgé en 1931 par le psychologue hongrois Géza Révész, à partir du verbe grec απτω qui signifie « toucher ».



« LA MAIN À LA PÂTE » : ce n'est pas un hasard si l'association éponyme a choisi cette expression pour promouvoir la pédagogie haptique : l'enfant, parce qu'il est acteur, apprend mieux.

Depuis, nous avons pris conscience que le toucher est loin d'être le seul sens haptique : le philosophe Maurice Merleau-Ponty notait que « la vision est palpation par le regard ». Plus proche de nous, le neurophysiologiste Alain Berthoz a développé la thèse que tous les sens sont, à des degrés divers, haptiques. Notre corps reçoit peu d'information de façon passive (sans aller la chercher). Bombardé d'information, il ne peut en traiter qu'une infime partie et, ainsi, il ne peut voir sans regarder ou entendre sans écouter. Par exemple, ce que nous « voyons » du château de Versailles dépend du mouvement de nos jambes, des Appartements du roi à la galerie des Glaces.

Ce caractère haptique de la perception éclaire d'une lumière nouvelle les principes de la pédagogie active, qui sous-tend l'enseignement de l'informatique par projets ou des sciences expérimentales en mettant la main à la pâte. Ces méthodes pédagogiques, qu'il serait plus exact de qualifier d'haptiques que d'actives, reposent sur l'idée que les élèves ne peuvent absorber de connaissances sans agir. Ils doivent programmer pour comprendre ce qu'est un programme informatique et construire un cadran solaire pour comprendre le mouvement de rotation de la Terre. Bombardés de connaissances dont ils ne sont capables de traiter qu'une petite partie, ils doivent aller chercher les connaissances afin de les intégrer.

L'idée s'invite de plus en plus dans les écoles. Elle n'est pourtant pas nouvelle. Pour l'homme du XXe siècle, ces méthodes, promues par John Dewey, Célestin Freinet et d'autres, constituaient des « méthodes de l'école moderne ». Mais c'est oublier une citation attribuée à Confucius (VIe siècle avant notre ère) : « J'entends et j'oublie, je vois et je me souviens, je fais et je comprends. » ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Excès de délicatesse

Les contextes tragiques favorisent la circulation d'informations fausses. En particulier, par une sorte de pudeur mal placée, les médias baissent parfois la garde.

L'attentat du 14 juillet à Nice est encore vif dans nos esprits, mais certaines histoires s'effacent déjà peu à peu. Par exemple, celle de Timothé Fournier, un jeune buraliste parisien mort en protégeant du camion meurtrier sa femme enceinte de sept mois. Il y a un problème cependant avec cette tragédie : après que la presse nationale et internationale s'en est émue, il s'est avéré que Timothé n'avait jamais existé. Une légende de plus inventée, non vérifiée et largement diffusée. L'origine de ce mythe est embarrassante, car l'information venait directement de l'Agence France-Presse (AFP). L'agence n'étant pas réputée pour son manque de sérieux, on peut se demander : que s'est-il passé ?

L'AFP a simplement été intoxiquée par le compte Twitter de la « cousine » de la victime chimérique. Une sorte de canular. Et comme cette agence alimente une partie de la presse, un formidable effet de cascade s'est produit. L'AFP a présenté ses excuses et a expliqué cette regrettable affaire en soulignant que la cousine avait donné luxe de détails, ce qui accréditait le témoignage, et que les journalistes n'avaient pas procédé à suffisamment de vérifications « par un excès de délicatesse ».

On peut sans doute ajouter que l'urgence à livrer une information n'est pas favorable à la prise du temps nécessaire à sa vérification, mais l'argument de la délicatesse est intéressant. En effet, ce n'est pas la première fois qu'un contexte social rend délicat la vérification des informations. Par exemple, après les attentats du 11-Septembre aux États-Unis, quelques voix s'élevèrent pour rappeler qu'il y avait eu, parmi les survivants, les enfants des victimes de l'effondrement des tours jumelles, que l'on appela les orphelins du 11-Septembre. Rapidement après la catastrophe, on créa même une association, la Twin Towers Orphan Fund, qui récolta des millions de dollars.

On estimait ce nombre d'orphelins à environ 10 000. Le raisonnement sous-jacent à cet émoi était le suivant : puisque cet attentat



LA PROMENADE DES ANGLAIS, à Nice, théâtre de l'attentat du 14 juillet 2016 – et d'un canular qui a piégé les médias.

© shutterstock.com/Bellena

a fait des milliers de morts, dont une partie avaient plusieurs enfants, il devait y avoir un grand nombre d'orphelins dont, disait la légende, certains erraient, affamés, dans le New Jersey. Il était urgent de leur venir en aide.

En réalité, il n'y a tout simplement pas eu d'orphelins des Twin Towers, parce qu'un enfant ne devient orphelin isolé que s'il perd ses deux parents (sauf en situation monoparentale, mais cette situation est rare). Autrement dit, seuls ceux dont les parents travaillaient tous deux au World Trade Center auraient pu être dans ce cas. L'erreur est ici si grossière que l'on a presque du mal à croire qu'elle ait pu accréditer le mythe. Pourtant, les faits sont là et il semble que la « délicatesse » a ici aussi joué un rôle pour inhiber l'esprit critique. L'ambiance n'était pas favorable aux raisonnements objectifs, d'autant que le thème impliqué (les enfants victimes) redoublait le caractère intolérable des événements du 11 septembre 2001.

Le statisticien français Jospeh Klatzmann fit une remarque du même genre en rappelant que certains, dans les années 1980, s'insurgeaient contre les 50 millions de morts annuels de famine dans le monde (le chiffre fut même repris sur une affiche de la campagne présidentielle), alors que le nombre total (toutes causes confondues) de morts annuelles ne dépassait pas 48 millions.

De même, en 1998, plusieurs lauréats du Nobel participèrent à une cérémonie où l'on alluma 40 000 bougies, chacune symbolisant un enfant mourant chaque jour de malnutrition. Il eut été de mauvais goût de faire remarquer qu'une simple extrapolation menait à 15 millions de morts d'enfant par an quand les statistiques officielles n'en dénombraient que 10 millions, et ce toutes causes confondues.

Bien entendu, ces chiffres demeurent effroyables, mais puisque nous cherchons tous une boussole pour nous orienter dans cet océan d'informations, nous ne devrions jamais prendre le risque, et les journalistes moins que quiconque, de plier l'échine sous une cascade de délicatesse. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



fête de la Science

du 8 au 16 octobre 2016













#FDS2016



Les marais et sites du sud de l'Iraq au patrimoine mondial de l'Unesco

par Cécile Michel, sur le blog Brèves mésopotamiennes

Le 17 juillet 2016, le comité de l'Unesco a décidé d'accéder à la demande des Iraquiens en classant au patrimoine mondial les Ahwar, marais du sud de l'Iraq et refuge de biodiversité, et trois grands sites archéologiques. Pour la première fois de son histoire, cet organisme a distingué une région présentant un patrimoine mixte, naturel et culturel. Parmi cet ensemble figurent les quatre zones humides marécageuses constitutives de l'un des plus grands deltas intérieurs, formé par les embouchures du Tigre et de l'Euphrate, les deux fleuves à l'origine de la Mésopotamie (pays-entre-les-fleuves). Il s'agit des « marais du centre », entre les fleuves, le marais Al-Hammar, incluant le lac salé du même nom, au sud de l'Euphrate, et le marais Hawizeh, à l'est du Tigre.

À l'origine, ces marais couvraient plus de 20 000 kilomètres carrés. L'explorateur et écrivain britannique Wilfred Thesiger a décrit la vie des populations arabes qui y habitaient dans les années 1950 dans *The Marsh Arabs*. Mais après la guerre du Golfe en 1991, Saddam Hussein a construit des canaux et des digues pour drainer les marais et ainsi traquer les rebelles chiites qui s'y étaient réfugiés. Lors de la chute du dictateur en 2003, près de 90 % des marais étaient asséchés et leur écosystème et leur diversité biologique détruits à jamais. Avant l'assèchement des marais, les oiseaux se comptaient par millions. Dès 2003, les Iraquiens ont détruit les digues. Après de nombreux efforts, les marais ont aujourd'hui retrouvé à peu près 40 % de leur surface d'origine. On peut désormais y voir évoluer une quarantaine d'espèces d'oiseaux.

Les trois autres éléments de cet ensemble sont les villes sumériennes Uruk and Ur et le site archéologique du Tell Eridu, trois sites qui ont subi des pillages importants au cours des guerres de ces vingt-cinq dernières années. Uruk, aujourd'hui Warka, est un tell énorme, vestige d'une ville créée au IVe millénaire et qui a gardé son importance jusqu'au tout début de notre ère. Cette ville a vu la naissance de l'écriture, vers 3400 avant notre ère, et fut la capitale de Gilgamesh, le célèbre héros de la littérature suméro-akkadienne. Ur (Tell Muqqayar) a livré le plus grand cimetière royal de Mésopotamie avec près de 1800 tombes et un matériel funéraire hors du commun.



Un marais du sud de l'Iraq.

© Luc Bachelot

Capitale d'un vaste empire à la fin du IIIe millénaire avant notre ère, Ur était un port de toute première importance dans l'économie mésopotamienne. Quant à Eridu (Abu Shahrain), c'est une ville sainte du IIIe millénaire, siège du temple principal du dieu de la sagesse et des eaux souterraines Enki.

Le classement de ces trois sites antiques au patrimoine mondial de l'Unesco favorise le retour des archéologues dans une région qui était jusqu'il y a peu inaccessible, en raison des conflits armés.

D'autres sites d'Iraq font actuellement partie du patrimoine mondial de l'Unesco, telle la ville d'Assur, capitale de l'Assyrie (l'actuelle Qal'at Cherqat), classée en urgence en 2003 car menacée par la construction d'un barrage dans la région de Makhoul. Ce projet de construction a semble-t-il été abandonné. Auparavant, la ville de Hatra avait rejoint le patrimoine mondial en 1985, mais ses vestiges ont été très endommagés par Daesh ces dernières années. La ville de Samarra figure aussi sur la liste depuis 2007, et la citadelle d'Erbil, dans le Kurdistan, a été classée en 2014. Bien d'autres sites archéologiques sont sur liste d'attente. Les capitales assyriennes de Ninive et Kalhu ont été largement endommagées par Daesh depuis 2014. Après avoir fait exploser le palais nord-ouest d'Assurnazirpal II, les terroristes ont rasé le temple de Nabû, dieu des scribes et des intellectuels – tout un symbole –, si l'on en croit des photos prises par satellite en juin dernier.

Les Iraquiens rêvent aujourd'hui d'ajouter la grande Babylone au palmarès, mais il y a beaucoup d'obstacles, dont les restaurations réalisées par Saddam Hussein et le château qu'il s'y est fait construire, ainsi que le complexe touristique bâti à proximité. L'Unesco a suggéré de transformer ces bâtiments en musée et centre de recherche. De plus, un oléoduc traverse le site archéologique, mais le département des Antiquités a obtenu qu'il soit déplacé. Espérons que l'Unesco accède à ce souhait et classe prochainement Babylone parmi les joyaux du patrimoine culturel mondial. ■

Cécile MICHEL est assyriologue et directrice de recherche du CNRS au laboratoire Archéologies et sciences de l'Antiquité, à Nanterre, et professeure à l'université de Hambourg. Elle préside l'International Association for Assyriology, et tient le blog Brèves mésopotamiennes (www.scilogs.fr/breves-mesopotamiennes).





Retrouvez tous nos blogueurs sur www.SciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.



Dans l'interêt de
la science
france
mathieu
vidard
la tête au carré
14:05-15:00
france
inter
intervenez
franceinter.fr

Le surprenant succès des **mammifères** au temps des dinosaures

Stephen Brusatte et Zhe-Xi Luo

On a longtemps cru qu'à l'époque des dinosaures, nos lointains parents mammifères étaient restés cantonnés à des formes de type musaraigne. En fait, pas du tout : de nouveaux fossiles racontent une histoire étonnamment plus complexe.

© James Gurney



UN DINOSAURE AU DÎNER : le contenu stomacal d'un spécimen de *Repenomamus*, un mammifère archaïque chinois d'il y a quelque 130 millions d'années, comprenait les os d'un bébé psittacosaure – un dinosaure.

Au début de l'hiver 1824, William Buckland affronte une salle comble à la Société géologique de Londres. Une fois de plus, car les cours magistraux de ce naturaliste distingué sont célèbres. Ses étudiants d'Oxford adorent sa façon de faire circuler des parties animales et des fossiles, tout en les discutant en grand habit professoral. Or le bruit court que Buckland a mis la main sur de gigantesques ossements et qu'il est enfin prêt à commenter après les avoir étudiés pendant dix ans… De fait, il apprend à la foule étonnée que ces os sont ceux d'un très ancien « lézard géant », qu'il a nommé *Megalosaurus*. La toute première découverte d'un dinosaure vient d'être rendue publique...

Ce jour-là, une autre annonce passe inaperçue. Elle est pourtant majeure, à tel point qu'avant de la faire, Buckland a consulté le plus grand paléontologue de son temps : Georges Cuvier. Très étonné, ce dernier lui a confirmé que les deux petites mâchoires trouvées avec les os géants appartiennent bien à des espèces de mammifères, « et plus spécifiquement marsupiales ». Une découverte déconcertante, car les spécialistes pensent alors que le groupe des mammifères date d'une époque géologique beaucoup plus récente.

Mieux : ces deux minuscules mâchoires portent des dents dotées de cuspides, c'est-à-dire d'élévations dans la couronne. Cela suggère qu'à l'époque des « lézards géants », les mammifères avaient déjà un long passé. Elles susciteront nombre de questions : à quand remontent les mammifères ? Quel a été leur sort sous les dinosaures ? À quand remonte la première forme mammalienne, c'est-à-dire dotée d'une fourrure, de glandes mammaires, d'un gros cerveau, d'une denture complexe et de sens aiguisés ? Et pourquoi la Terre est-elle aujourd'hui dominée par les quelque 5 000 espèces de mammifères placentaires, dont la nôtre ?

Malheureusement, la trop grande rareté des fossiles mammaliens anciens a empêché de traiter ces questions pendant le siècle qui a suivi la conférence de Buckland. Puis le XXe siècle a vu se multiplier les découvertes de dents de mammifères archaïques. Les paléomammologues français en ont par exemple trouvé en nombre dans les gisements du nord-est de la France, notamment dans celui, célèbre, de Saint-Nicolas-de-Port. Les choses se sont accélérées depuis que nous disposons de la spectaculaire série de mammifères archaïques rassemblée au cours des quinze dernières années. Grâce à ces nouveaux fossiles, les chercheurs sont enfin en mesure de retracer depuis les origines un parcours évolutif qui commence avec de minuscules animaux vivant à l'ombre de *Megalosaurus* et va jusqu'au foisonnement des mammifères actuels. Une évolution qui se révèle bien plus ancienne et surtout bien plus buissonnante qu'on ne le pensait.

Un cliché paléontologique veut que les protomammifères aient stagné pendant la plus grande partie du Mésozoïque (252 à 66 millions d'années). Durant cette immense ère géologique qui regroupe le Trias (252 à 201 millions d'années), le Jurassique (201 à 145 millions d'années) et le Crétacé (145 à 66 millions d'années), les dinosaures ont dominé, tandis que les parents des mammifères actuels passent pour avoir vécu une dangereuse existence au ras du sol à la recherche d'insectes…

Or une série de fossiles de protomammifères découverts en divers endroits du globe contredit ce stéréotype. Illustrant les nombreuses adaptations dont ont été capables ces animaux, elle suggère que le succès des mammifères et des formes apparentées qui les ont précédés est venu de leur capacité à se diversifier, plasticité qui était déjà présente sous les dinosaures.

LES AUTEURS





Stephen BRUSATTE est paléontologueà l'université d'Édimbourg, en Écosse.

Zhe-Xi LUO est paléontologue à l'université de Chicago, aux États-Unis.

L'ESSENTIEL

- Les paléontologues s'interrogent depuis longtemps sur les raisons du succès évolutif des mammifères, mais manquaient de données fossiles.
- Les fossiles découverts au cours des quinze dernières années changent la donne. Ils permettent de retracer l'évolution de la lignée des mammifères.
- La diversification des mammifères est beaucoup plus ancienne qu'on ne le pensait, bien antérieure à la crise qui a fait disparaître les dinosaures non aviens.

Les origines modestes des mammaliaformes

Les mammifères sont aujourd'hui des vertébrés terrestres ou marins qui donnent naissance à des jeunes bien développés. Ils comprennent à l'heure actuelle trois ordres : les monotrèmes pondeurs d'œufs, les marsupiaux qui développent leurs embryons au sein d'une poche abdominale et les placentaires qui le font à l'intérieur du ventre. Comme celles de toutes les dynasties, leurs origines sont modestes ! Les premiers animaux ressemblant à des mammifères sont issus des cynodontes, un groupe de reptiles dits mammaliens apparu au Permien supérieur (260 à 252 millions d'années). Les cynodontes ont disparu à la fin de cette période, quand une gigantesque éruption volcanique élimina presque toutes les formes de vie. L'extinction de certains amphibiens et de la majeure partie des reptiles qui dominaient la planète a entraîné l'émergence de la plupart des groupes connus ensuite : les tortues, les lézards, les grenouilles, les crocodiles, les

dinosaures et, à partir des cynodontes, les mammaliaformes.

Ce terme rassemble tous les mammifères actuels ou passés et toutes les formes non reptiliennes qui leur sont apparentées. Les plus anciennes traces de mammaliaformes datent d'environ 210 millions d'années, donc de la fin du Trias, une période d'évolution intense que l'on connaît de mieux en mieux grâce notamment aux très beaux fossiles dénichés à la fin des années 1990 par l'équipe de Farish Jenkins, de l'université Harvard, dans le fjord Fleming au Groenland. Et à ceux provenant de Lorraine et particulièrement de Saint-Nicolas-de-Port étudiés par Maxime Debuysshere du Muséum national d'histoire naturelle.

Parce qu'ils sont en grand nombre, ces fossiles livrent le premier portrait d'ensemble des mammaliaformes. Trois grands types de ces ancêtres immédiats des mammifères existaient : les kuehneotheriidés, les morganucodontidés et les haramiyidés. De la taille d'une souris, ces premiers mammaliaformes avaient déjà certaines caractéristiques mammaliennes, par exemple de la fourrure, cette couche de poils qui isole du froid et aide à évacuer la chaleur quand il fait chaud. Leur crâne était muni d'une articulation simplifiée fonctionnant à l'aide de muscles manducateurs plus grands, permettant de renforcer et d'affiner la mastication. Le point est notable, puisque les cynodontes qui les ont précédés avalaient des morceaux de nourriture «tout rond». La mastication de ces mammaliaformes du Trias est aussi rendue plus efficace par les cuspides de leurs dents.

Les fossiles de mammaliaformes du Groenland ou d'autres endroits révèlent ainsi qu'un changement majeur dans le développement des dents a accompagné la transformation de la mâchoire. Tandis que les dents des cynodontes croissaient en permanence et pouvaient repousser, celles des mammaliaformes triasiques étaient des dents définitives succédant à des dents de lait.

Nous maudissons parfois notre dentition, par exemple quand nous perdons définitivement une dent, mais la façon dont elle se développe est intimement liée au trait le plus indissociable de notre biologie : l'allaitement. C'est parce qu'ils n'ont pas de dents, ou parce qu'ils ont des dents de lait, que nos petits peuvent se nourrir du précieux liquide produit par les glandes mammaires de leur mère. Il est donc probable que, comme les mammifères actuels, les petits des mammaliaformes triasiques se nourrissaient déjà de lait il y a plus de 200 millions d'années.

Ce tournant a favorisé l'évolution des mammaliaformes vers un métabolisme plus intense (le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques nécessaires à la survie de l'organisme), qui les a rendus capables d'occuper des environnements froids et obscurs, nocturnes par exemple. Ce métabolisme augmenté a aussi favorisé la croissance de leurs petits, donc leur survie.

Il y a 200 millions d'années, **les petits mammaliaformes** se nourrissaient déjà du lait de leur mère

Ces mammaliaformes anciens nous renseignent également sur les débuts d'autres traits spécifiques des mammifères, notamment ceux dont l'apparition a augmenté les capacités cognitives et sensorielles. Grâce aux progrès des scanners, il est en effet devenu possible depuis une dizaine d'années de visualiser avec précision l'anatomie interne des os fossilisés, notamment celle des cavités endocrâniennes et des passages de nerfs. Cette nouvelle imagerie a révélé que les protomammifères avaient des encéphales nettement plus grands que ceux de leurs ancêtres, même si leur taille ne se compare pas à celle des cerveaux mammifères actuels. Ces encéphales étaient dotés d'aires auditives et de bulbes olfactifs plus conséquents, ce qui implique que leurs propriétaires avaient une ouïe et un odorat plus fins. Ils comportaient aussi des aires cérébrales spécialisées augmentant les sensations tactiles de la peau et des poils. Autre innovation importante : une solide ossature entourait désormais l'oreille interne, l'isolant du vacarme considérable de la mastication.

Même si les minuscules mammaliaformes triasiques possédaient déjà nombre de traits cruciaux des mammifères modernes, ils n'étaient pas les animaux dominants de leur époque. Ce statut était réservé aux dinosaures et aux crocodiles, puisque plusieurs de leurs formes étaient en train d'atteindre des tailles considérables et de s'installer tout en haut de la chaîne alimentaire.

Ce qui leur manquait par la taille, les protomammifères le compensaient par la diversité. L'étude menée récemment par l'équipe de Pamela Gill, de l'université de Bristol, a révélé l'étonnante variété de leurs régimes alimentaires. À l'aide de logiciels spécialisés et des images de très haute résolution, obtenues par tomographie à rayons X à partir du faisceau d'un synchrotron, ces chercheurs ont modélisé les fonctions des dents.

Ils ont ainsi montré que les morganucodontidés avaient des mâchoires assez puissantes pour écraser les gros insectes pourvus d'un solide exosquelette, tels les coléoptères d'aujourd'hui, tandis que les kuehneotheriidés avaient des mâchoires graciles plantées de dents délicates qui ne pouvaient probablement pas croquer plus qu'un papillon ou qu'un ver mou. Les travaux de Zhe-Xi Luo (l'un d'entre nous) ont montré par ailleurs que les mâchoires très mobiles des haramiyidés pouvaient sectionner et écraser de petites plantes.

Ainsi, la bonne coordination motrice et les sens aiguisés rendus possibles par un plus gros encéphale, ainsi qu'un métabolisme plus intense, ont permis aux mammaliaformes de s'épanouir dans le froid et l'obscurité. Ces mêmes qualités les ont sans doute aussi aidés à traverser la crise biologique de la limite Trias-Jurassique. Le registre fossile et géologique révèle en effet qu'il y a quelque 200 millions d'années, la Pangée – un supercontinent

L'HISTOIRE ÉVOLUTIVE DES PREMIERS MAMMIFÈRES

Apparus au Trias (252 à 201 millions d'années), les premiers mammifères nous rappellent les castors, les écureuils volants et les belettes... Ils étaient déjà très diversifiés, et même si la plupart d'entre eux ne sont pour nous que des parents éloignés, ils mettent enfin les paléontologues en mesure de reconstituer l'évolution des mammifères, depuis les humbles formes évoquant une musaraigne du début, jusqu'à la grande variété des mammifères d'aujourd'hui. Les évolutions de la forme des dents et de l'anatomie des oreilles sont parmi les principales innovations qui ont avantagé ce groupe d'animaux.

DES DÉBUTS MODESTES

Les mammaliaformes, les plus anciens animaux ressemblant à des mammifères, étaient déjà apparus à l'époque de la Pangée, c'est-à-dire il y a plus de 200 millions d'années, alors que les continents ne formaient encore qu'une seule masse.

GRANDE DIVERSIFICATION SOUS LES DINOSAURES

Les paléontologues ont longtemps pensé que l'évolution des mammifères avait stagné jusqu'à la fin des dinosaures. Mais de nouveaux fossiles révèlent que les premiers mammifères se sont beaucoup diversifiés dans l'ombre des dinosaures, en adoptant des modes de vie variés.

Morcellement de la Pangée

Trias supérieur | Jurassique inférieur | Jur. moyen | Jurassique supérieur | Crétacé inférieur

210 | 200 | 190 | 180 | 170 | 160 | 150 | 140 | 130 | 120

Millions d'années

Les cynodontes, cousins des mammiliaformes

Morganucodontidés

Morganucodon

Kuehneotheriidés

14 centimètres (taille estimée)

Mammaliaformes

Haramiyidés

Castorocauda

Agilodocodon

Docofossor

8 cm

Monotrèmes

Mammaliaformes archaïques

Mammifères

Fruitafossor

Volaticotherium

28 cm

Triconodontes

Repenomamus

Gondwanathériens

Multituberculés

Rugosodon

23 cm

Symmétrodontes

Sinodelphys

Eomaia

Thériens

Métathériens

Euthériens

Torrejonia

Repenomamus
105 cm

UNE OUÏE ÉVOLUÉE
L'oreille interne *(en bleu)* des mammaliaformes anciens était entièrement attachée à la mâchoire inférieure, comme celle des cynodontes, leurs cousins reptiliens.

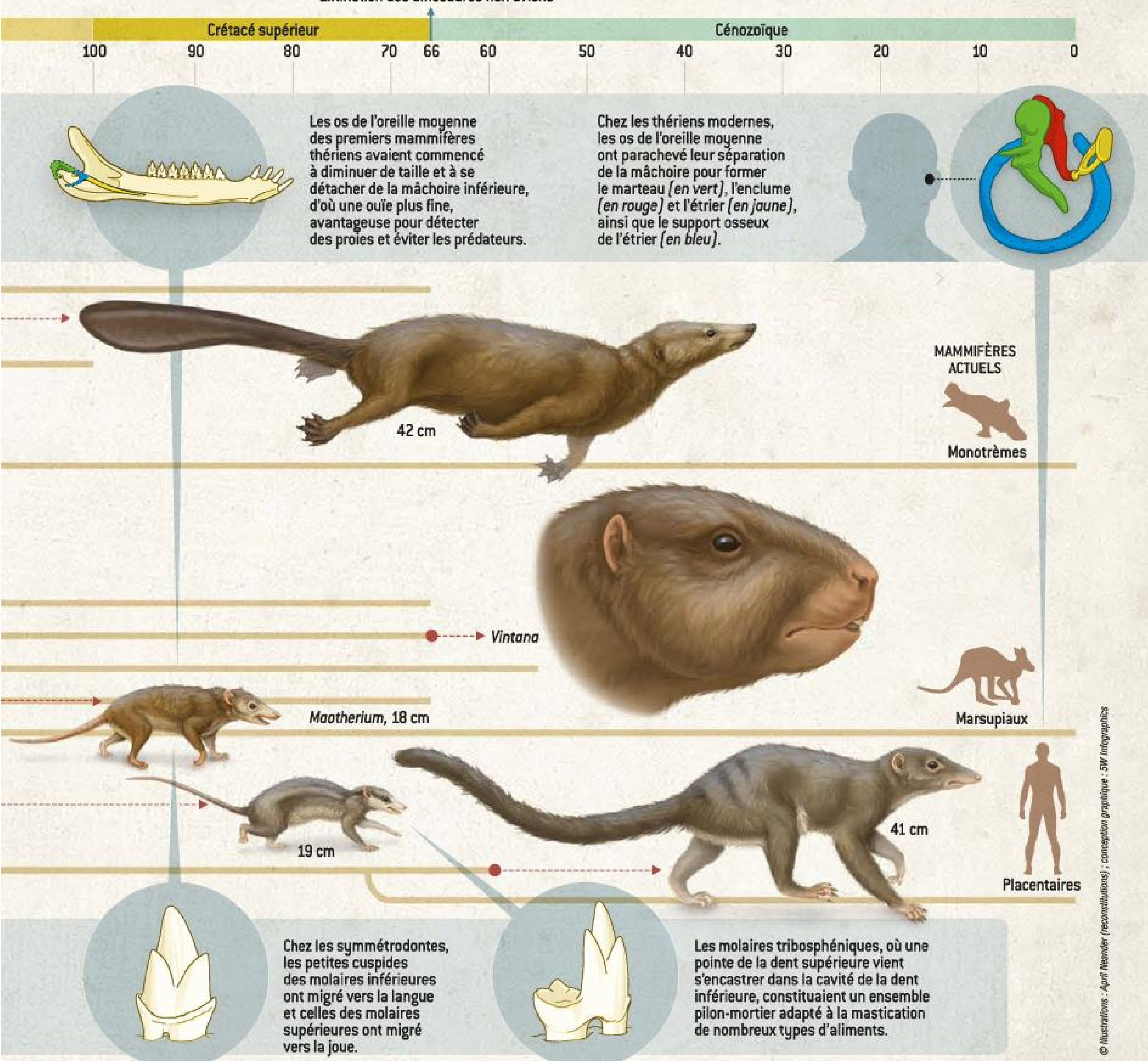
ÉVOLUTION DES DENTS
Les premiers mammifères étaient dotés de molaires triconodontes similaires à celles de leurs cousins cynodontes, qui comportaient trois cuspides principales alignées, dont une grande, et de deux plus petites.

FLEURS ET MAMMIFÈRES À FOISON

L'apparition puis la multiplication explosive des plantes à fleurs ont favorisé les mammifères thériens. Ce groupe inclut les marsupiaux, dont les embryons se développent dans une curieuse poche abdominale de la mère, et les placentaires, dont les embryons se développent à l'intérieur du ventre de la mère.

PLACE AUX NOUVEAUX MAMMIFÈRES

Les mammifères qui s'étaient beaucoup diversifiés à l'époque des dinosaures ont failli disparaître avec eux. Les descendants des quelques formes survivantes, toutefois, ont donné les groupes actuels après s'être à nouveau diversifiés afin d'occuper toutes les niches écologiques laissées vacantes par les dinosaures.



© Illustrations : April Neander (reconstitutions) ; conception graphique : SW Infographics



© Avec l'aimable autorisation de Zhe-Xi Luo

AGILODOCODON SCANSORIUS, un petit mammifère vieux de 160 millions d'années, grimpait aux arbres. Avant sa découverte en Chine, les paléontologues n'imaginaient pas que les modes de vie arboricoles étaient apparus si tôt.

rassemblant alors la plupart des terres émergées – s'est fragmentée. D'énormes effusions de magma se sont produites dans les zones de fractures des plaques continentales, ce qui a pollué massivement l'atmosphère et dévasté les écosystèmes. Comme les protomammifères pouvaient exploiter des niches écologiques inaccessibles à bien d'autres vertébrés terrestres, ils ont bien résisté au cataclysme.

Plusieurs types dinosauriens ont survécu aussi, de sorte que les dinosaures dominaient encore au Jurassique. Mais environ 30 millions d'années après le début de cette période géologique, la lignée des mammifères a connu une diversification explosive. Ce sont surtout les milliers de fossiles collectés durant la dernière décennie dans les roches jurassiques de la formation de Tiaojishan, dans le nord-est de la Chine, qui nous l'apprennent.

Ces vestiges extrêmement bien conservés comprennent des fossiles d'insectes, de dinosaures à plumes et les squelettes de plus d'une vingtaine de mammaliaformes tardifs et de mammifères. Beaucoup sont entourés d'un halo de poils. Il y a 160 millions d'années, ces animaux vivaient dans des forêts parsemées de lacs, où il arrivait fréquemment que des éruptions volcaniques les ensevelissent brusquement.

L'étude des fossiles mammaliens de la formation de Tiaojishan par Zhe-Xi Luo et des collègues, notamment l'équipe de Jin Meng du Muséum américain d'histoire naturelle à New York, révèle toute une variété de formes occupant un grand nombre de niches écologiques. *Castorocauda*, par exemple, était un mammaliaforme tardif de la taille d'un castor ; comme lui, il avait des pattes palmées et une queue aplatie, ce qui en fait le plus ancien mammaliaforme aquatique connu à ce jour.

La pelle a été inventée au Jurassique

Un autre mammaliaforme tardif, *Docofossor*, était un fouisseur, capable de creuser des terriers à l'aide de ses pattes en forme de pelle, où les articulations des doigts étaient soudées. On observe une anatomie comparable aujourd'hui chez les taupes dorées, des fouisseuses aveugles des déserts de Namibie et du Kalahari.

Quant à *Agilodocodon*, c'était un mammaliaforme agile et capable de grimper aux arbres ; il accédait à la sève dont il se nourrissait en rongeant l'écorce avec ses dents en forme de spatules. La plus étrange de toutes ces formes est cependant *Volaticotherium*, un mammifère archaïque ressemblant à nos écureuils volants actuels, puisqu'il planait d'une branche à l'autre à l'aide de la membrane de peau tendue de chaque côté du corps entre ses pattes avant et arrière.

Ces fossiles d'animaux très particuliers ne proviennent pas exclusivement de Chine : *Fruitafossor*, par exemple, une forme que Zhe-Xi Luo et John Wible du muséum Carnegie à Pittsburgh en Pennsylvanie ont décrite, a été découvert dans le Colorado. Il s'agissait d'un fouisseur mangeur de fourmis.

Pour résumer, ces formes jurassiques présentaient à peu près tous les traits fondamentaux que l'on observe chez les petits mammifères actuels. Ces caractères sont donc apparus au Jurassique. Pour caractériser la vitesse de diversification des mammifères jurassiques, Roger Close, de l'université de Birmingham, a placé les évolutions de leurs caractères squelettiques dans la chronologie géologique. Il en ressort qu'au Jurassique, les mammifères ont évolué jusqu'à deux fois plus vite que les mammaliaformes triasiques. C'est au cours de cette diversification accélérée que sont apparues les principales branches de l'arbre de parenté des mammifères, à savoir la lignée des monotrèmes actuels (les mammifères pondeurs d'œufs) et celle des thériens actuels, qui comprend les marsupiaux et les placentaires.

Les mammaliaformes et mammifères jurassiques que nous venons d'évoquer font surtout partie de lignées disparues. Ils n'en sont pas moins essentiels pour déterminer les origines des mammifères actuels, car ils révèlent les caractéristiques morphologiques des ancêtres de ces derniers. Les branches de l'arbre de parenté des mammifères sur lesquelles ils se trouvent ont en effet poussé en même temps que celles portant les prédécesseurs des mammifères d'aujourd'hui. Elles ont subsisté au Jurassique, puis au Crétacé, avant de disparaître. Auparavant, une intense radiation évolutive leur a fait expérimenter de nombreux régimes alimentaires et modes de locomotion, lesquels convergent plus ou moins entre eux et avec ceux des ancêtres des mammifères modernes. Aussi les paléontologues sont-ils intrigués : ils aimeraient comprendre pourquoi ces formes archaïques n'ont pas atteint l'époque actuelle.

Quelles qu'en soient les raisons, au début du Crétacé, il y a environ 145 millions d'années, le plan d'organisation des mammifères modernes était déjà plus ou moins en place. Il leur assurait une croissance rapide et un gros cerveau, ainsi que des molaires « tribosphéniques ». On désigne ainsi une molaire de la mâchoire supérieure dotée de trois pointes qui viennent s'imbriquer dans la molaire inférieure. L'ensemble des deux dents fonctionne donc comme un pilon qui écrase les aliments efficacement. Cette

innovation peut sembler marginale, mais elle a constitué un atout pour les mammifères, qui ont pu grâce à elle adopter une grande variété de régimes alimentaires.

Équipés de ces dents tribosphéniques très polyvalentes, les thériens se sont diversifiés, donnant les euthériens (les « bons thériens »), c'est-à-dire un grand groupe comprenant notamment les mammifères actuels : les placentaires et les métathériens (les « après-thériens »), ces derniers comprenant les marsupiaux. Les membres les plus archaïques et les plus anciens de ces groupes proviennent de forêts fossiles chinoises où, il y a quelque 125 millions d'années, ils se faufilaient entre les pattes de dinosaures à plumes.

Même si ces premiers thériens, peu nombreux et rarement plus grands qu'un petit rongeur, étaient déjà présents au début du Crétacé, leur heure de gloire n'avait pas encore sonné. Au cours des 30 millions d'années suivantes, la place prédominante parmi les mammifères était plutôt occupée par des formes un peu plus archaïques – les triconodontes et les symmétrodontes.

Repenomamus, mangeur de petits dinosaures

C'est parmi eux que sont apparues les plus grandes formes mammaliennes connues du Mésozoïque : celles du genre *Repenomamus*, vieilles d'environ 130 millions d'années. L'une d'entre elles, *Repenomamus giganticus*, mesurait environ un mètre de long pour 14 kilogrammes. Cet animal carnivore, doté d'une longue queue, ne devait pas être un bon coureur, mais ses puissantes incisives, ses canines et prémolaires aiguisées montrent qu'il était capable d'attaquer des proies vivantes, d'une taille un peu inférieure à la sienne. Pour preuve, les os d'un petit dinosaure et de petits mammifères ont été retrouvés dans le contenu fossilisé de l'estomac de l'un de ses spécimens…

C'est aussi au début du Crétacé que s'est préparé l'immense événement biologique qui allait tout changer pour les mammifères : l'avènement des angiospermes. C'est en effet il y a quelque 125 millions d'années que les plantes à fleurs – aujourd'hui les végétaux les plus répandus sur Terre – ont commencé à se diversifier de façon explosive. Ces plantes à fleurs, donc à fruits, ont bouleversé la plupart des écosystèmes, offrant aux mammifères de nouvelles sources de nourriture : les fruits et les fleurs ainsi que tous les nouveaux insectes qui s'en repaissaient. Capables à la fois de broyer et de déchiqueter, les molaires tribosphéniques des thériens se sont alors révélées de bons outils pour mastiquer et ingurgiter ces nouveaux aliments, tout particulièrement les insectes à carapace dure. Résultat : les thériens ont proliféré tandis que les mammifères à dentures plus archaïques, tel *Repenomamus*, ont décliné et fini par disparaître.

De l'impuissance surgit la puissance

Parce qu'ils paraissent frêles, les mammifères du temps des dinosaures nous semblaient sans importance. Nos qualités, les mammifères n'avaient pu les développer qu'après. En fait, ce serait plutôt le contraire… Relégués dans le noir ou dans le froid, toujours en fuite ou sur le qui-vive, obligés de rendre très vite leurs petits indépendants, les mammaliaformes et les mammifères archaïques ont dû s'adapter : ils ont acquis une fourrure, des glandes mammaires pour allaiter les petits, des sens aiguisés et un métabolisme rapide. Ces stratégies de survie d'hier ont fait le succès évolutif des mammifères d'aujourd'hui.

Les thériens n'ont pas toujours dominé la Terre

En dépit de l'aubaine représentée par les nouvelles sources de nourriture, la prédominance des thériens n'était pas assurée. Pendant qu'ils se régalaient d'insectes, d'autres groupes de mammifères plus archaïques développaient des dents complexes particulièrement appropriées pour découper et écraser les plantes à fleurs. Les continents septentrionaux ont été envahis par ces mammifères aux dents multituberculées proéminentes. Ressemblant à des rats, ils n'avaient cependant rien à voir avec eux : l'évolution a simplement fait converger leur plan d'organisation avec celui des rongeurs actuels.

Récemment, Gregory Wilson, de l'université de Washington, et David Grossnickle, de celle de Chicago, ont mené des analyses statistiques des caractères anatomiques de ces multituberculés. Ils ont montré que ces animaux ont prospéré à la fin du Crétacé, donnant, sous l'influence de la diversification des plantes à fleurs, de très nombreuses formes dotées de molaires complexes et tendant devenir de plus en plus grosses.

Il semble que, sur les continents méridionaux, les thériens avaient des rivaux. Même si les paléontologues en savent peu sur ces organismes méridionaux du Crétacé tardif, de nouvelles découvertes suggèrent qu'un étrange groupe a prospéré à l'époque : les gondwanathériens (les « thériens du Gondwana »), qui, en dépit de leur nom, n'étaient pas de vrais thériens.

Des décennies durant, les seules données relatives à ces mystérieux mammifères se sont résumées à quelques dents isolées : des molaires poussant tout au long de la vie comme chez les chevaux et les vaches – donc sélectionnées pour mastiquer des végétaux résistants. En 2014, une équipe dirigée par David Krause, de l'université de Stony Brook à New York, a mis au jour

à Madagascar le premier crâne de gondwanathérien jamais découvert. L'espèce en question, *Vintana*, ressemblait à un castor et se nourrissait peut-être d'herbes – des végétaux familiers aujourd'hui, qui, au Crétacé tardif, étaient en train d'apparaître.

Il y a 66 millions d'années, à la toute fin du Crétacé, tout allait bien pour les mammifères. Après les dizaines de millions d'années d'évolution buissonnante des mammaliaformes au Trias, les multituberculés masticateurs de plantes et les gondwanathériens insérés dans le réseau alimentaire des dinosaures prospéraient. Ils restaient modestes toutefois, cantonnés aux sous-bois, et semblaient peu capables d'investir de nouveaux habitats.

Après le Crétacé, les placentaires se sont diversifiés très vite

Puis la situation a encore changé radicalement. Une nouvelle catastrophe biologique s'est produite : la crise Crétacé-Tertiaire. La chute d'un gros astéroïde, les incendies géants, les raz-de-marée monstrueux et les tremblements de terre associés, des éruptions volcaniques massives ont dévasté la Terre. Ils ont entraîné des changements climatiques et environnementaux insupportables pour la quasi-totalité des dinosaures. À l'exception des oiseaux, ce groupe, qui avait dominé la Terre pendant plus de 150 millions d'années, s'est alors éteint, ainsi que la plupart des types d'animaux. Nombre de genres de mammifères ont eux aussi disparu en masse.

La vaste étude de terrain entamée dans le Montana par William Clemens, de l'université de Californie à Berkeley, puis continuée par Gregory Wilson, documente ainsi leur déclin. Elle a mis en évidence que tous les grands mammifères dont la subsistance dépendait du réseau trophique des dinosaures ont disparu du registre fossile. C'est pourquoi les métathériens, pourtant en plein essor à la fin du Crétacé, ont été presque tous éliminés. Quelques espèces seulement ont traversé la crise. Sinon, nous ne connaîtrions pas les marsupiaux actuels, leurs descendants…

Des mammifères placentaires se trouvaient aussi parmi les survivants. L'horloge moléculaire, cette technique qui mesure le temps écoulé en dénombrant les mutations (supposées se produire à un rythme régulier) de l'ADN, suggère d'une part que l'ancêtre commun définissant le groupe des placentaires a vécu à l'ombre des dinosaures au Crétacé, et d'autre part que les principaux sous-groupes de placentaires – les rongeurs et les primates notamment – sont apparus dès la fin de la crise Crétacé-Tertiaire. En investissant les niches écologiques vacantes laissées par les dinosaures, ils se sont alors diversifiés très vite.

À quel point ? La durée de l'« arrivée au pouvoir » de ces mammifères se mesure en effet en milliers d'années, ce qui, à l'échelle géologique, est dérisoire. Ainsi, l'extinction des dinosaures apparaît comme le déclencheur de ce que l'on pourrait nommer la révolution placentaire.

L'un de nous (Stephen Brusatte) participe actuellement aux recherches de terrain visant à mieux saisir les facettes de ce moment crucial de l'évolution. Les Badlands, une région du massif de Nacimiento, au Nouveau-Mexique, regorgent d'informations sur la manière dont les mammifères ont prospéré après la disparition des dinosaures. Avec Thomas Williamson, du Musée d'histoire naturelle et des sciences du Nouveau-Mexique, qui fouille ces terrains depuis plus de vingt-cinq ans, ils cherchent à identifier les espèces de mammifères correspondantes et à mettre en évidence quels traits spécifiques les ont aidés à passer la crise de la fin du Crétacé et pourquoi. Ils ont constaté la présence de très nombreuses formes, allant d'insectivores de la taille d'une musaraigne à des carnassiers à dents de sabre, en passant par des herbivores gros comme des vaches. Or toutes ces espèces étaient déjà présentes 500 000 ans à peine après la chute de l'astéroïde, ce qui confirme la rapidité avec laquelle les placentaires se sont imposés.

Ces résultats rejoignent les constatations faites par Emmanuel Gheerbrant, du CNRS à Paris, dans les faunes de mammifères de cette époque au Maroc.

Parmi les espèces de placentaires repérées par Thomas Williamson se trouve notamment *Torrejonia*, un animal au corps gracile de la taille d'un chiot, qui devait s'accrocher aux branches à l'aide de ses longs doigts fins. Quand on contemple l'élégant squelette de ce protoprimate, on l'imagine presque sautant d'arbre en arbre malgré ses 63 millions d'années. Quelque 60 millions d'années d'évolution plus tard, des singes bipèdes, dont les ancêtres immédiats pratiquaient ce même mode de vie, seront devenus capables de philosopher. ■

BIBLIOGRAPHIE

Q. J. Meng *et al.*, **An arboreal Docodont from the Jurassic and Mammaliaform ecological diversification**, *Science*, vol. 347, pp. 764-768, 2015.

T. E. Williamson *et al.*, **The origin and early evolution of Metatherian mammals : The Cretaceous record**, *ZooKeys*, article 465, en ligne le 17 décembre 2014.


GRENOBLE SCIENCES
CONSEIL EXPERTISE LABELLISATION ÉDITION
COLLECTION GRENOBLE SCIENCES
PHYSIQUE ATOMIQUE ET SPECTROSCOPIE OPTIQUE
Michel MOISAN - Danielle KÉROACK - Luc STAFFORD
edp sciences
Pour celles et ceux qui utilisent la spectroscopie optique
... et d'autres titres sur des thèmes corrélés
LA SPECTROSCOPIE DE RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE
FONDEMENTS
APPLICATIONS
SPECTROSCOPIES INFRAROUGE ET RAMAN
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE
PROBLÈMES CORRIGÉS
TOME 2
TOME 1
Neutron and X-ray Spectroscopy
F. Hippert - E. Geissler - J.L. Hodeau
E. Lelièvre-Berna - J.R. Regnard
PLASMAS COLLISIONNELS
PHYSIQUE DES DÉCHARGES RF ET MICRO-ONDE
Atomic Properties in Hot Plasmas
From Levels to Superconfigurations
J. Bauche, C. Bauche-Arnoult, O. Peyrusse
DESCRIPTION DE LA SYMÉTRIE
DES GROUPES DE SYMÉTRIE AUX STRUCTURES FRACTALES
www.grenoble-sciences.fr
GRENOBLE SCIENCES
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes
POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : laboutique.edpsciences.fr
Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr
AUVERGNE – RhôneAlpes

Un vol de sept ans pour quelques grammes **d'astéroïde**

Dante Lauretta

L'astéroïde Bennu est-il une menace réelle pour la Terre ? Pour le savoir et pour étudier ce corps céleste de près, la sonde spatiale OSIRIS-REx part à sa rencontre. Cette mission rapportera aussi quelques grammes de roche afin de mieux comprendre l'origine de la vie.

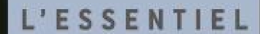
De tous les corps célestes qui croisent périodiquement l'orbite de la Terre, l'astéroïde Bennu est l'un des plus menaçants. Découvert en 1999, ce bolide d'un demi-kilomètre de large a été baptisé du nom de l'oiseau Bénou, dieu de la création dans la mythologie égyptienne. En effet, Bennu regorge de composés organiques et de minéraux riches en eau qui lui donneraient la capacité de disséminer les graines fondamentales de la vie telle que nous la connaissons s'il tombait sur une planète stérile. Cependant, s'il heurtait la Terre, l'astéroïde sèmerait, au contraire, la mort.

Or les astronomes prévoient qu'en 2135, Bennu passera si près de la Terre (à une distance inférieure de celle qui nous sépare de la Lune) que sa trajectoire en sera modifiée et rendrait alors inévitable une collision avec notre planète à la fin du XXIIe siècle. Bien que personne ne soit en mesure de prédire où l'astéroïde Bennu tomberait, des calculs simples montrent que l'énergie de l'impact libérera l'équivalent de 3000 mégatonnes de TNT. Dans un tel scénario catastrophe, les dirigeants mondiaux auront essentiellement deux options pour éviter un désastre : évacuer de vastes régions du monde, ou infléchir la trajectoire de l'astéroïde.

Les planificateurs du futur étudieront la faisabilité de ces interventions grâce, notamment, aux données recueillies plus d'un siècle auparavant par une sonde de la Nasa nommée OSIRIS-REx. À l'heure où cet article est mis sous presse, cette sonde devait être lancée le 8 septembre. Son objectif est simple : rendre visite à Bennu et ramener sur Terre des échantillons de l'astéroïde.

La naissance d'OSIRIS-REx

Vestiges de la formation du Système solaire, les astéroïdes sont les messagers des époques les plus lointaines de notre histoire, uniques porteurs de données relatives à des événements antérieurs de plusieurs centaines de millions d'années à la formation de la Terre. Les échantillons d'astéroïdes apporteraient des réponses



- Les astéroïdes sont des vestiges intacts de la naissance du Système solaire. Ils recèlent des informations sur la formation des planètes et sur l'origine de la vie.
- L'exploitation de leurs ressources minières est envisagée par des entreprises ou des États.
- Certains, tel Bennu, risquent de heurter la Terre.
- La mission OSIRIS-REx étudiera Bennu de près. Elle rapportera un petit échantillon du sol de cet astéroïde carboné, que les scientifiques pourront analyser.

TEL UN OISEAU-MOUCHE faisant du surplace au-dessus d'une fleur pour la butiner, la sonde OSIRIS-REx prélèvera en 2020 un échantillon de la surface riche en carbone de l'astéroïde Bennu. C'est la mission de retour d'échantillons d'astéroïde la plus ambitieuse jamais tentée.

sur la naissance du Soleil, sur la formation des planètes ou sur les origines de la vie terrestre. Par ailleurs, il est crucial d'étudier ces objets pour trouver des moyens de se protéger du cataclysme que provoquerait une collision avec l'un d'eux.

Mais pourquoi concevoir des missions complexes, longues et coûteuses consistant à envoyer une sonde sur un astéroïde et à en rapporter des échantillons, alors que des morceaux d'astéroïdes, les météorites, tombent régulièrement sur la Terre ? Malheureusement, peu de ces météorites, voire aucune, nous parviennent intactes. Elles s'enflamment en rentrant dans l'atmosphère et leur surface fond. En outre, la plupart ne sont découvertes que des années, des siècles ou des millénaires après leur chute, et leurs caractéristiques si particulières s'effacent peu à peu avec l'exposition prolongée à la pluie et au vent.

En revanche, dans l'environnement stérile de l'espace profond, la plupart des astéroïdes ont conservé leur état depuis des milliards d'années. Leur rendre visite est le seul moyen d'accéder aux informations qu'ils recèlent.

Bennu est un astéroïde des plus remarquables. Il s'est formé il y a environ un milliard d'années lorsqu'un agrégat de matière a été éjecté des restes d'une protoplanète dérivant entre Mars et Jupiter. Contrairement aux fragments de météorites qui remplissent les musées, composés de roche et de métal (des matériaux suffisamment robustes pour résister à la chute sur la Terre), Bennu est une masse noire constituée de matériaux carbonés fragiles. Ces composés seraient les précurseurs de la biochimie terrestre, fondée sur le carbone. Ainsi, Bennu est un système qui mérite toute l'attention des chercheurs et dont la trajectoire redoutable est paradoxalement la condition d'une possible mission d'échantillonnage avec retour.

L'histoire d'OSIRIS-REx débute en février 2004. J'étais alors maître de conférences et travaillais au Laboratoire lunaire et planétaire de l'université d'Arizona, aux États-Unis, dont le directeur était Michael Drake. Ce dernier s'est vu confier par la Nasa, conjointement avec l'entreprise aérospatiale Lockheed Martin, le poste de responsable scientifique d'une mission dont l'objectif était d'aller chercher un échantillon d'astéroïde. À la demande de Michael Drake, j'intégrais également ce projet pour devenir son adjoint.

Ma tâche initiale consistait à définir la stratégie scientifique de la mission. Depuis plus d'une décennie, je travaillais sur les météorites et je connaissais toutes les questions en suspens auxquelles il ne serait possible de répondre que grâce à l'analyse d'un échantillon de matériau suffisamment gros et intact provenant d'un astéroïde. À l'époque, un seul autre projet était comparable au nôtre : la mission *Hayabusa* de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise. Son rendez-vous avec l'astéroïde Itokawa, en 2005, en vue d'y prélever des échantillons, a été un succès mitigé. La sonde est parvenue à recueillir 1 500 grains microscopiques de minéraux, bien moins que prévu. En outre, Itokawa est un objet brillant et rocheux dont l'histoire et le potentiel scientifique sont très différents des astéroïdes carbonés sombres tels que Bennu.

L'échantillon collecté par OSIRIS-REx sera un témoin de la jeunesse du Système solaire ; il devrait contenir des précurseurs de la biochimie terrestre

Un soir, j'ai décidé de coucher sur le papier les principaux thèmes scientifiques de la mission. J'ai écrit quatre mots : origines, spectroscopie, ressources et sécurité. Des échantillons parfaitement conservés d'un astéroïde nous en apprendraient davantage sur les origines des planètes et l'apparition de la vie. Des études spectroscopiques de sa surface révéleraient si le sol renferme des ressources intéressantes susceptibles d'être un jour exploitées. Plus nous en apprendrons sur l'orbite, la composition et les autres caractéristiques de Bennu, meilleures seraient nos chances de déterminer s'il présente une menace pour la Terre, et les moyens éventuels d'en défléchir la trajectoire pour notre sécurité. Enfin, les données recueillies *in situ* par la sonde seraient comparées aux observations faites depuis la Terre et aux modèles théoriques : nous serions en mesure de cerner et de corriger les défauts qui entachent nos observations et nos modèles théoriques, ce qui consoliderait l'étude d'une grande variété d'astéroïdes du Système solaire.

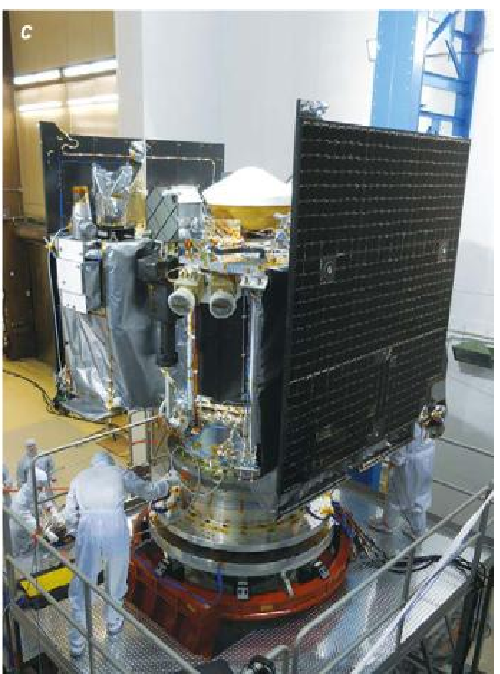
Cette ébauche de liste est devenue le fil conducteur de la mission et l'origine de son acronyme. OSIRIS-REx signifie *Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer*. Le 25 mai 2011, la Nasa a confirmé la mise en œuvre de la mission OSIRIS-REx. Malheureusement, Michael Drake est décédé peu après, en septembre 2011, et j'ai dû le remplacer en tant que responsable scientifique.

Le voyage d'OSIRIS-REx a débuté il y a quelques semaines par le lancement de la sonde depuis Cap Canaveral, en Floride, sur une fusée Atlas V. Elle voyagera à travers le Système solaire durant près de deux ans avant de rejoindre Bennu en août 2018. Elle se mettra en orbite autour de l'astéroïde pendant plus de trois ans, pour le cartographier de façon exhaustive et y prélever un échantillon d'au moins 60 grammes.

Cet échantillon témoignera d'événements qui se sont déroulés tout au long de l'histoire du Système solaire. Les plus vieux minéraux contenus dans la structure de Bennu sont des grains « présolaires » microscopiques qui se sont formés dans les vents stellaires émis par des étoiles mourantes. Ces grains sont les constituants primordiaux des planètes. Les constituants les plus jeunes de Bennu sont des minéraux et des composés qui ont été modifiés à l'échelle du micromètre et au fil du temps par l'exposition aux rayons cosmiques et aux éruptions solaires. L'étude par OSIRIS-REx de ces processus d'« érosion spatiale » sur un astéroïde carboné sera sans précédent.







L'ÉPOPÉE D'OSIRIS-REx a débuté douze ans avant son lancement en septembre 2016. La sonde a tout d'abord été assemblée *(a)*, puis testée dans une chambre à vide *(b)* et dans des laboratoires d'acoustique *(c)* au sein du complexe Space Systems de Littleton, dans le Colorado, aux États-Unis.

(a), (c) Lockheed Martin ; (b) S. Platts, université de l'Arizona

À l'instar des autres astéroïdes carbonés, Bennu est majoritairement constitué de molécules organiques et de minéraux argileux riches en eau. Une partie de cette eau a été liquide autrefois, chauffée au cœur de l'astéroïde par la désintégration d'éléments radioactifs à courte durée de vie tels que l'aluminium 26 et le fer 60.

Les composés organiques et l'eau constituent la matière première brute des éléments de base de la vie sur Terre que sont l'ADN, l'ARN et les protéines. Un nombre immense d'astéroïdes carbonés a dû tomber sur la Terre dans sa jeunesse, d'où la question: ces corps ont-ils semé des germes de vie sur notre planète? Il est difficile de répondre, car il ne reste pas de roches non altérées suffisamment anciennes pour raconter cette histoire.

La mission OSIRIS-REx n'a pas pour seul objectif de découvrir les briques originelles de la vie. Elle recueillera aussi des informations importantes pour notre avenir. Plusieurs entreprises privées et de nombreux États étudient la possibilité d'une exploitation minière des astéroïdes pour pallier la rareté ou l'épuisement des ressources terrestres. Ces acteurs évaluent les techniques à mettre en place pour extraire des métaux précieux afin de les utiliser ensuite sur notre planète, mais également des méthodes utilisant de la glace d'eau afin de produire, directement dans l'espace, du carburant destiné aux fusées. Grâce à sa capacité à cartographier précisément un astéroïde et à manœuvrer autour de celui-ci, OSIRIS-REx servira de précurseur pour de futures missions d'exploitation minière sur des astéroïdes carbonés.

La menace Bennu

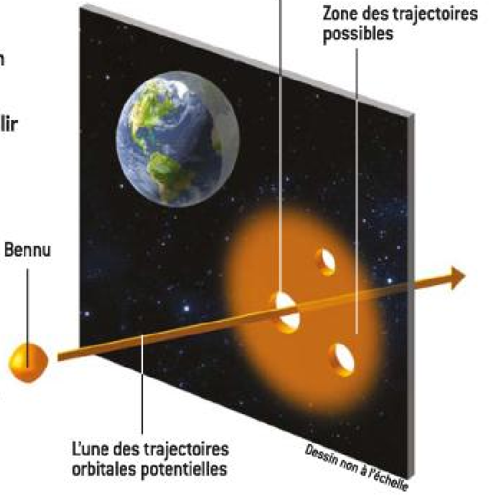
Un autre volet de la mission d'OSIRIS-REx consiste à améliorer les techniques de prévision d'éventuelles collisions d'astéroïdes avec la Terre et les méthodes de prévention. En effet, pour déterminer si un astéroïde percutera la Terre, il faut mesurer son orbite avec une précision extrême. Pour apprécier la difficulté de cette tâche,

L'AUTEUR



Dante LAURETTA est professeur de planétologie à l'université d'Arizona. Ses principaux thèmes de recherche sont la formation de planètes habitables et l'apparition de la vie extraterrestre.

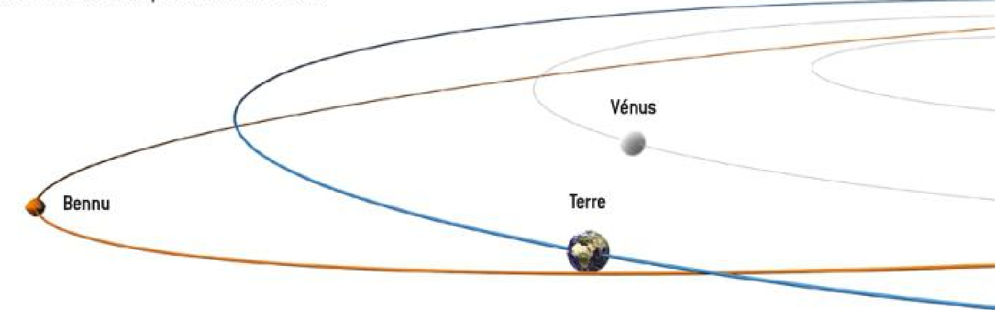
En septembre 2016, la sonde OSIRIS-REx de la Nasa a entrepris un voyage interplanétaire vers Bennu, un astéroïde géocroiseur de 500 mètres de diamètre qui risque un jour de frapper la Terre ❶. En améliorant nos connaissances sur les phénomènes qui perturbent l'orbite de Bennu, OSIRIS-REx révélera si l'astéroïde va effectivement entrer en collision avec la Terre, et nous fournira des informations cruciales pour éviter une telle catastrophe ❷. L'objectif principal de la mission, cependant, consistera à recueillir un échantillon de la surface de Bennu riche en molécules organiques, datant de l'époque de la formation du Système solaire ❸.





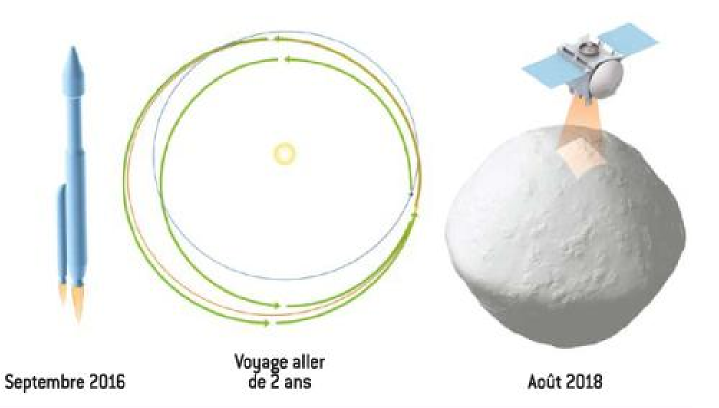
❶ Une proximité alarmante

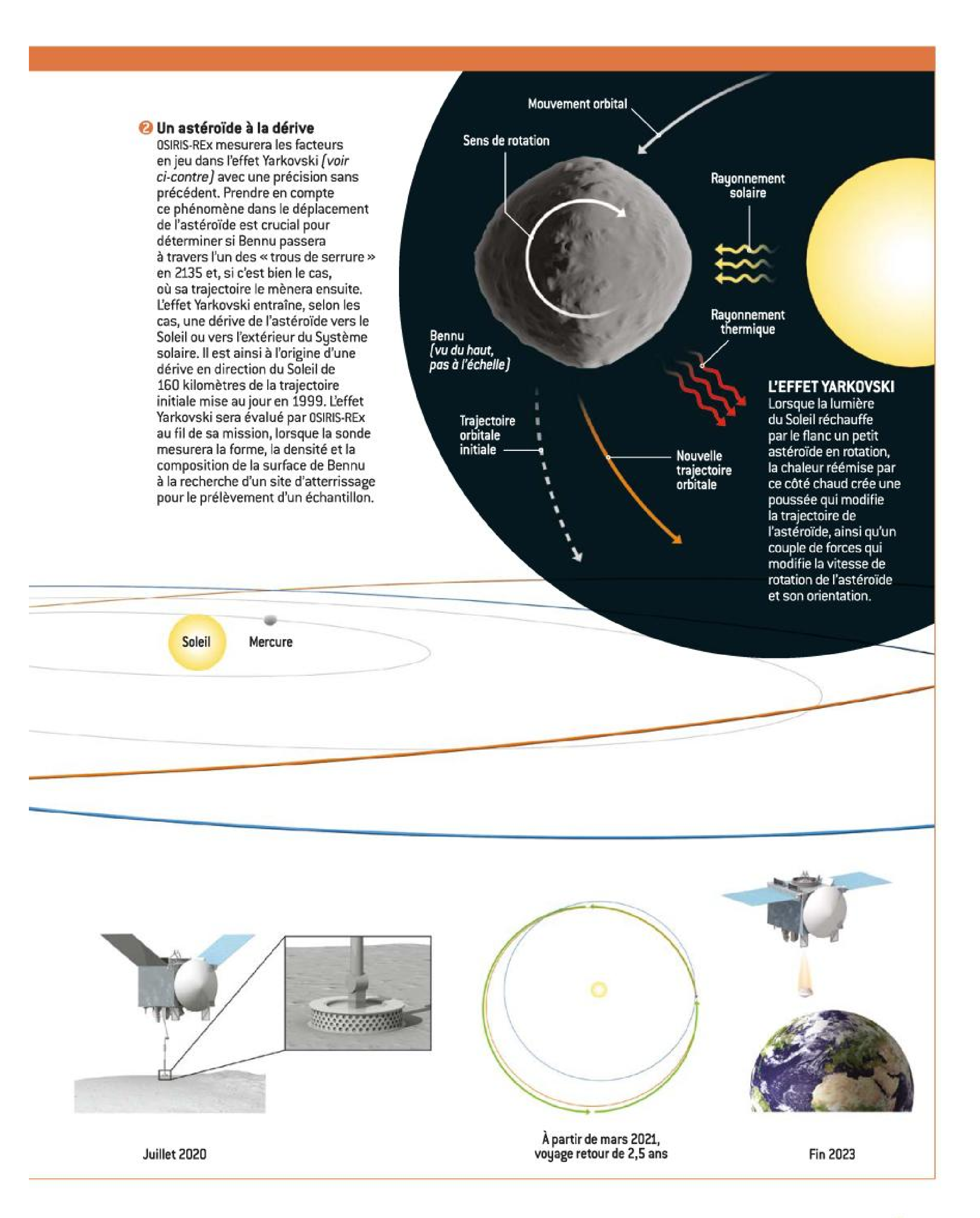
En 2135, Bennu frôlera la Terre et s'en approchera à moins de 300 000 kilomètres, soit une distance inférieure à celle qui nous sépare de la Lune. Au cours de cette traversée infralunaire, la trajectoire de l'astéroïde sera modifiée par le champ gravitationnel de la Terre. Parmi toutes les déviations possibles, certaines amèneraient Bennu sur une trajectoire qui donnerait lieu à une collision lors d'un des prochains passages de l'astéroïde. Il existe ainsi quelques régions de taille kilométrique, tels des « trous de serrure » autour de la Terre, où Bennu ne doit pas passer, au risque de devenir dangereux. S'il frappe la Terre, Bennu libérerait autant d'énergie que l'explosion de toutes les ogives nucléaires dont disposent les États-Unis.



❸ Le voyage d'OSIRIS-REx

Après son lancement en septembre 2016, la sonde effectuera une croisière de deux ans jusqu'à Bennu (avec un survol de la Terre pour acquérir un supplément de vitesse). En 2018, à son arrivée en orbite autour de Bennu, OSIRIS-REx commencera à cartographier l'astéroïde afin d'identifier de possibles sites d'atterrissage. Selon les meilleures estimations, la sonde se posera brièvement sur l'un des sites vers la fin de 2020 et récupérera un échantillon grâce à son bras rétractable. Cinq secondes plus tard, la sonde décollera pour entamer son retour. Après deux années et demie de voyage vers la Terre, OSIRIS-REx éjectera la capsule d'échantillons qui rentrera dans l'atmosphère et s'échouera dans le désert de l'Utah, où elle sera récupérée.





❷ Un astéroïde à la dérive

OSIRIS-REx mesurera les facteurs en jeu dans l'effet Yarkovski *(voir ci-contre)* avec une précision sans précédent. Prendre en compte ce phénomène dans le déplacement de l'astéroïde est crucial pour déterminer si Bennu passera à travers l'un des « trous de serrure » en 2135 et, si c'est bien le cas, où sa trajectoire le mènera ensuite. L'effet Yarkovski entraîne, selon les cas, une dérive de l'astéroïde vers le Soleil ou vers l'extérieur du Système solaire. Il est ainsi à l'origine d'une dérive en direction du Soleil de 160 kilomètres de la trajectoire initiale mise au jour en 1999. L'effet Yarkovski sera évalué par OSIRIS-REx au fil de sa mission, lorsque la sonde mesurera la forme, la densité et la composition de la surface de Bennu à la recherche d'un site d'atterrissage pour le prélèvement d'un échantillon.

L'EFFET YARKOVSKI

Lorsque la lumière du Soleil réchauffe par le flanc un petit astéroïde en rotation, la chaleur réémise par ce côté chaud crée une poussée qui modifie la trajectoire de l'astéroïde, ainsi qu'un couple de forces qui modifie la vitesse de rotation de l'astéroïde et son orientation.

considérons les distances et les forces en jeu. Bennu fait le tour du Soleil en 438 jours à une vitesse orbitale de plus de 28 kilomètres par seconde. En une seule orbite, cet astéroïde parcourt plus de un milliard de kilomètres. Au plus loin, l'astéroïde se trouve à quelque 340 millions de kilomètres de la Terre, et il s'en approche au plus près tous les six ans.

Une orbite bien mesurée, mais qui peut varier

Cette périodique proximité a permis aux astronomes d'étudier l'orbite de Bennu pour en faire l'astéroïde le plus précisément mesuré. L'incertitude sur le demi-grand axe de sa trajectoire elliptique est de seulement 6 mètres, sur une longueur totale de 168 505 699 049 kilomètres. Cela équivaudrait à mesurer la distance entre New York et Los Angeles avec une précision d'environ un tiers de millimètre. Mais la seule précision orbitale ne suffit pas pour anticiper les déplacements de Bennu, car de nombreuses forces externes sont susceptibles de modifier l'orbite de l'astéroïde.

Afin de déterminer la trajectoire de Bennu, l'équipe d'OSIRIS-REx utilise des modèles numériques de haute précision qui prennent en compte l'influence des forces externes agissant sur l'astéroïde, en particulier les effets gravitationnels du Soleil, de la Lune et des huit planètes, ainsi que d'autres gros astéroïdes et de la planète naine Pluton. Joue aussi le caractère légèrement aplati de la Terre, qui induit des variations notables de la trajectoire de l'astéroïde lorsque celui-ci passe à proximité.

Grâce à la précision de ces modèles, les astronomes prédisent que Bennu passera à moins de 300 000 kilomètres de la Terre en 2135. Ce qu'il adviendra ensuite est plus difficile à prévoir. Mais une chose est sûre : si Bennu traverse certaines régions particulières de l'espace infralunaire, les effets gravitationnels cumulés seront tels que l'astéroïde déviera et sa trajectoire présentera un risque de collision avec la Terre vers la fin du XXIIe siècle.

Nous n'en savons pas assez sur Bennu pour prédire s'il traversera effectivement l'une des zones de l'espace qui le dévieraient dangereusement. À ce jour, nous estimons la probabilité d'un impact en 2196 à environ 1/10 000. Si l'on considère toutes les trajectoires d'impacts potentiels de l'astéroïde entre 2175 et 2196, la probabilité de collision augmente pour atteindre 1/2 700. Heureusement, Bennu semble avoir tout autant de chances d'être complètement éjecté du Système solaire interne que de frapper la Terre. S'il évite l'une ou l'autre de ces issues, l'astéroïde a une probabilité équivalente de finir par tomber dans le Soleil et une probabilité un peu plus faible d'entrer en collision avec Vénus. Dans une moindre mesure, un accrochage avec Mercure, Mars ou Jupiter reste également possible.

La mission OSIRIS-REx nous fournira des informations sur la surface de Bennu et sa structure interne, ainsi que sur l'ensemble des perturbations que l'astéroïde subit. Ces données amélioreront la précision de nos prévisions.

Au cours de ses trois ans en orbite, OSIRIS-REx ne se posera que 5 secondes sur Bennu

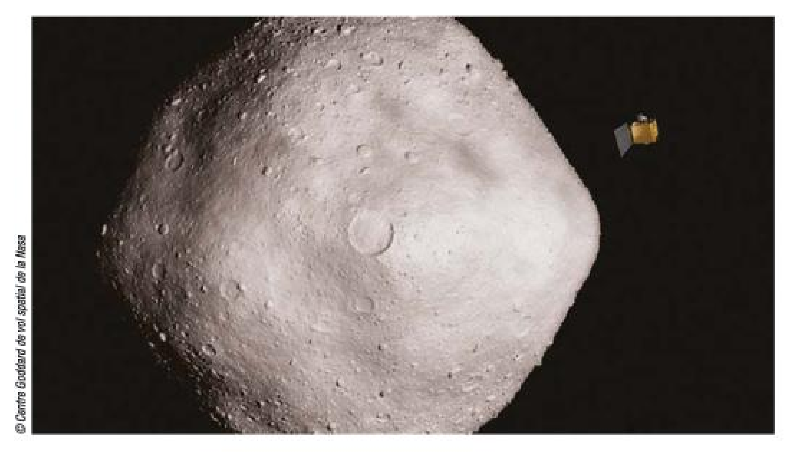
Cependant, la plus grande contribution d'OSIRIS-REx portera sur l'étude d'un phénomène non gravitationnel récemment découvert, l'effet Yarkovski *(voir page 43)*. Celui-ci décrit la force exercée sur un petit astéroïde de forme irrégulière lorsqu'il absorbe la lumière solaire et renvoie l'énergie vers l'espace sous forme de chaleur. S'il n'est pas distribué de façon homogène sur l'ensemble de l'astéroïde, le rayonnement thermique réémis agit comme un minuscule propulseur et entraîne une lente dérive de l'orbite. Les astéroïdes dont la rotation est de sens direct (qui tournent d'ouest en est, comme la Terre) s'éloignent du Soleil sous l'effet de cette poussée. À l'inverse, les astéroïdes à la rotation rétrograde, tel Bennu, dérivent vers l'intérieur du Système solaire.

Nous avons déjà utilisé des télescopes terrestres et spatiaux pour mesurer l'effet Yarkovski sur Bennu et démontré que son orbite s'est décalée de plus de 160 kilomètres depuis sa découverte en 1999. Cela signifie que Bennu a probablement des origines plus lointaines dans la ceinture d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, et qu'il aurait par la suite migré vers l'intérieur de la ceinture et atteint sa position actuelle.

L'effet Yarkovski agit aussi sur la rotation de Bennu : la lumière frappe de façon asymétrique la surface de l'astéroïde et le rayonnement réémis crée un couple de forces qui augmente sa vitesse de rotation. L'une des conséquences de ce phénomène est la déformation du corps : du matériau de surface des pôles se déplace vers l'équateur sous l'effet de la force centrifuge qui se renforce (ce qui explique la forme en toupie de Bennu). Le remaniement à grande échelle de la surface qui en résulte a peut-être exposé du matériau frais, non érodé, à la surface de Bennu, ce qui serait idéal pour prélever un échantillon.

En mesurant la rotation de Bennu, sa superficie et son émission thermique, OSIRIS-REx effectuera une étude détaillée de l'effet Yarkovski et de son impact sur l'astéroïde. L'amélioration de nos connaissances sur l'effet Yarkovski permettra de mieux évaluer les risques liés aux astéroïdes géocroiseurs. En outre, une meilleure compréhension de ce phénomène sera cruciale pour les éventuelles futures missions de déflexion des astéroïdes, un moyen envisagé pour repousser ces bolides spatiaux vers une trajectoire moins menaçante.

Depuis son élaboration au milieu des années 2000 jusqu'à sa conclusion dans les années 2020, le programme OSIRIS-REx représente un investissement de centaines de millions de dollars et de nombreuses heures de travail pour une équipe de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens. Tous



© Centre Goddard de vol spatial de la Nasa

OSIRIS-REX À L'APPROCHE DE BENNU. Sur cette image de synthèse, la sonde semble bien petite à côté de l'astéroïde d'un demi-kilomètre d'envergure. Par sa taille, ce corps céleste serait dangereux si son orbite croisait la trajectoire de la Terre. Cependant, du fait de sa composition primitive, Bennu constitue une cible intéressante et accessible pour une mission d'extraction et retour d'un échantillon.

ces efforts et ces dépenses seront à l'esprit de l'ensemble des acteurs du projet lors de la phase cruciale qui ne durera pas plus de cinq petites secondes, lorsque OSIRIS-REx devra se poser pour redécoller aussitôt après avoir prélevé un échantillon à la surface de l'astéroïde.

Toute cette opération reposera sur l'instrument TAGSAM (*Touch-And-Go Sample Acquisition Mechanism* ou « mécanisme d'acquisition d'échantillon par posé-décollé »). Ce dernier est constitué de deux principaux éléments : une tête de prélèvement et un bras de positionnement articulé. La tête émettra un jet d'azote gazeux qui « fluidifiera » un fragment de sol et le propulsera dans une chambre de prélèvement. TAGSAM contient assez d'azote pour trois tentatives d'échantillonnage – trois, pas une de plus. Le bras articulé positionnera la tête pour le prélèvement, puis la ramènera pour une analyse visuelle et la placera dans une capsule pour le retour sur Terre.

Comme solution de secours, 24 pastilles de contact avec la surface sont réparties sous le socle de TAGSAM. Elles récolteront du matériau à grains fins au moment où elles toucheront la surface de l'astéroïde.

La préparation de cette manœuvre finale occupera la plus grande part des trois années de révolution de la sonde autour de Bennu. Avec ses caméras, ses lasers, ses antennes radio et ses spectromètres, OSIRIS-REx effectuera de multiples relevés à haute résolution de l'astéroïde dans son intégralité. À partir de ces données, les équipes terrestres reconstruiront une carte de Bennu et détermineront un site principal de prélèvement (et un autre de secours), en fonction de la sécurité, de la facilité d'extraction et de la valeur scientifique attendue du matériau présent. Les sites les plus intéressants sur le plan scientifique devraient contenir une variété de composés organiques, de minéraux riches en eau et d'autres matériaux susceptibles de nous aider à savoir si les astéroïdes ont contribué à l'origine de la vie sur Terre.

Dès que l'équipe d'OSIRIS-REx aura choisi le site de prélèvement et effectué toutes les répétitions générales de rigueur, la manœuvre finale sera lancée. Bennu sera alors probablement aux confins de son orbite par rapport à la Terre, à plus de 18 minutes-lumière. L'équipe du projet n'aura alors plus aucun moyen d'intervenir et devra attendre que le processus automatique se déroule.

En trois poussées réparties sur quelques heures, OSIRIS-REx quittera son orbite, s'alignera avec le site d'atterrissage et descendra lentement vers la surface de l'astéroïde. Il se posera à une vitesse relative de 10 centimètres par seconde au plus. TAGSAM disposera de 5 secondes pour recueillir ses échantillons avant que la sonde ne redécolle et s'élève à une altitude d'environ 10 kilomètres au-dessus de Bennu. Là, l'instrument fera une série de tests pour s'assurer du succès de l'échantillonnage.

La mission s'achèvera en 2023... si tout va bien

En 2021, la sonde allumera ses moteurs principaux pour rapporter son précieux échantillon sur Terre. Fin 2023, après avoir largué la capsule de retour d'échantillon dans l'atmosphère terrestre, OSIRIS-REx allumera une ultime fois ses moteurs et rejoindra définitivement une orbite autour du Soleil. La capsule de retour d'échantillon pénétrera le haut de l'atmosphère terrestre à une vitesse avoisinant 45 000 kilomètres par heure, sous la protection d'un bouclier thermique capable d'évacuer 99 % de son énergie de rentrée. À une altitude de 3 000 mètres, la capsule déploiera un parachute pour atterrir en douceur dans le désert de l'Utah, sept ans après le début de son voyage.

L'échantillon sera récupéré et transporté jusqu'au centre spatial Johnson de la Nasa où il sera stocké de façon optimale. Des morceaux en seront ensuite distribués auprès de la communauté scientifique pour étude, ce qui occupera des chercheurs pendant plusieurs décennies. ■

BIBLIOGRAPHIE

Météorites, astéroïdes, comètes, *Dossier Pour la Science*, n° 90, janvier-mars 2016.

D. S. Lauretta *et al.*, **The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu**, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 50 (4), pp. 834-849, 2015.

A. Rubin, **Les secrets des météorites primitives**, *Pour la Science*, n° 425, mars 2013.

D. S. Lauretta et H. Y. McSween (Éds.), **Meteorites and the early Solar system II**, University of Arizona Press, 2006.

R. Schweickart et al., **Remorqueur d'astéroïdes**, *Pour la Science*, n° 319, mai 2004.



LA FIXATION *POSTMORTEM* D'UN CERVEAU à l'aide d'un hydrogel permet d'observer chaque neurone de la structure et ses connexions, comme ici dans le cortex préfrontal d'une souris.

Gélifier le cerveau

pour mieux l'explorer

Karl Deisseroth

Grâce à une nouvelle méthode à l'interface entre la chimie et la biologie, des neurobiologistes observent le million de milliards de connexions du cerveau, jusqu'aux plus profondément enfouies.

Notre système nerveux ressemble à une tapisserie tissée de fils interconnectés. Ces fils, les axones – de minces fibres que projettent les neurones –, transportent une information électrique d'un neurone à d'autres. Dans le cerveau, des axones à longue portée s'entrelacent avec des fibres plus courtes pour former un réseau qui transmet des signaux et traite l'information.

Pour comprendre les mécanismes internes du cerveau, les scientifiques doivent déchiffrer comment les éléments de cette tapisserie neuronale sont organisés. Mais comprendre le rôle d'un axone nécessite aussi une vision globale du cerveau qui n'occulte pas l'axone individuel et son contexte. Toutefois, il est impossible d'y parvenir avec les techniques classiques d'imagerie, car les molécules de graisse (les lipides) présentes partout dans le cerveau (en particulier dans les membranes des cellules) diffractent la lumière des appareils d'imagerie et empêchent de dépasser les couches cellulaires les plus superficielles pour atteindre les profondeurs du cerveau. Le cerveau n'étant ni transparent ni plat comme un tissu, il faut donc un outil spécial.

Aujourd'hui, une nouvelle technologie ouvre des perspectives passionnantes, apportant un moyen de voir l'intérieur du cerveau entier et de déterminer à la fois les trajectoires et les propriétés moléculaires de chaque fibre. Conçue dans notre laboratoire, cette méthode s'appuie sur la chimie des hydrogels, des polymères qui forment un réseau tridimensionnel de compartiments connectés capables de retenir l'eau sans se dissoudre.

L'idée est de créer un squelette tridimensionnel de polymère à l'intérieur du tissu biologique. On commence par imprégner d'un gel transparent le cerveau d'un animal de laboratoire ou d'un humain *postmortem*. Ce gel se lie aux molécules clés porteuses d'information, notamment les protéines et les acides nucléiques (l'ADN et l'ARN), et ce faisant les protège. L'étape suivante consiste à éliminer des tissus les composants sans intérêt ou qui diffusent la lumière, comme les lipides. Enfin, on introduit une multitude d'indicateurs fluorescents et autres marqueurs dans l'ensemble de la structure (en plus d'être transparent, le gel est conçu pour permettre l'infusion rapide de ces sondes), ce qui permet, en éclairant, de visualiser directement diverses fibres et molécules d'intérêt à très haute résolution partout dans le cerveau.

Cette nouvelle technique ouvre de nombreuses perspectives. Des scientifiques utilisent cette approche pour relier la forme physique de voies neuronales impliquées dans l'action et la cognition à leur fonction comportementale, qu'il s'agisse d'un mouvement ou d'une mémorisation. La méthode a aussi aidé à élucider des processus impliqués dans la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques, l'autisme, la toxicomanie et les troubles anxieux. Nous avons même aidé à monter une société visant à explorer les applications des tissus d'hydrogel dans le diagnostic du cancer. Car la méthode est maintenant appliquée à divers organes et tissus de l'organisme.

L'AUTEUR



Karl DEISSEROTH est professeur de bio-ingénierie et de psychiatrie à l'université Stanford.

L'ESSENTIEL

- **On ne comprendra le fonctionnement du cerveau que lorsque l'on combinera son étude aux échelles cellulaire et globale.**
- **Toutefois, à cause des lipides qu'il contient, le cerveau est trop opaque pour que les techniques classiques d'imagerie optique en explorent plus de 50 micromètres d'épaisseur.**
- **De nouvelles techniques éliminent ces lipides et soutiennent le « squelette » restant.**
- **Ces méthodes permettent d'étudier le câblage de circuits neuronaux spécifiques contrôlant divers comportements.**

Page précédente : avec l'aimable autorisation du Deisseroth Lab, université Stanford, et Li Ye

Vers la transparence

Rendre un cerveau transparent est si difficile que même l'évolution, en plusieurs centaines de millions d'années, n'y est pas parvenue chez les grands animaux. Pourtant, l'invisibilité apporterait des avantages considérables : certaines espèces de crevettes et de poissons ne présentent-elles pas un degré de transparence qui a certainement favorisé leur sélection au fil de l'évolution (par exemple en leurrant les prédateurs) ? Certains poissons sont ainsi dépourvus d'hémoglobine, la protéine qui colore le sang en rouge. Mais même chez ces animaux, le système nerveux central reste au moins partiellement opaque, malgré une intense pression de sélection. Rien ne laisse la lumière se propager sans encombre à travers un cerveau vivant.

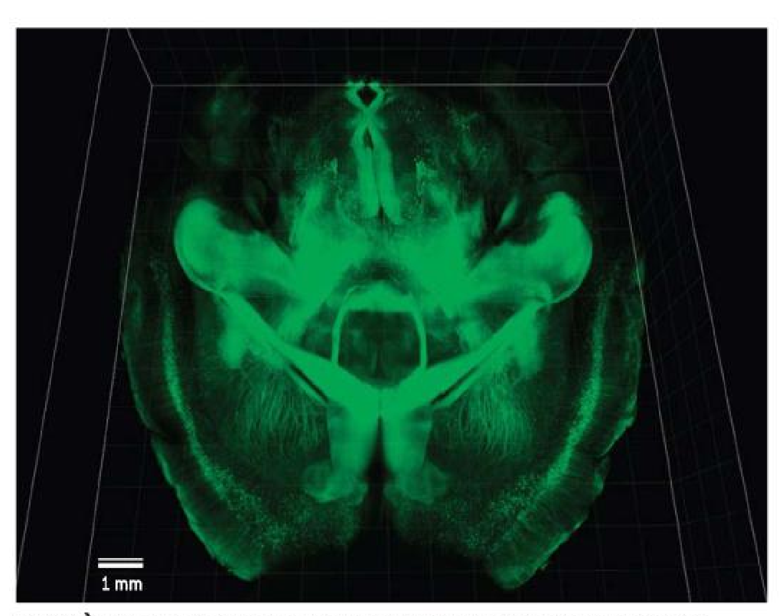
Cette opacité résulte de la diffusion de la lumière dans le tissu nerveux. Les photons rebondissent aux interfaces entre la graisse et l'eau (à cause des différences de vitesse de propagation de la lumière dans les deux substances) et dans des directions apparemment aléatoires (en raison de la complexité structurale des connexions neuronales). Un effet délicat à supprimer par l'ingénierie ou l'évolution, d'autant plus que dans le cerveau, les barrières lipidiques qui constituent les membranes des cellules jouent un rôle clé : elles servent de matériau isolant pour les ions qui orchestrent la circulation des impulsions électriques le long des axones. Peut-on contourner cette difficulté ?

En 2009, je me suis attaqué au problème. Mon objectif était de mettre au point une technique qui rendrait transparent un cerveau mammifère mature tout en permettant un marquage détaillé de diverses molécules. À l'époque, des centaines de laboratoires avaient commencé à utiliser une technique que mes collègues et moi-même avions développée entre 2005 et 2009 pour allumer et éteindre, avec de la lumière, différents composants spécifiques des circuits du cerveau. Associant des lasers, des fibres optiques et des gènes de protéines photoactivables nommées opsines microbiennes, issues d'algues et de bactéries, cette technique, appelée optogénétique, contrôle précisément l'activité dans des neurones spécifiques au sein de cerveaux vivants entiers, et ce alors même que les animaux courent, sautent, nagent, socialisent et se livrent à des comportements complexes.

À l'été 2009, cinq ans après sa première démonstration expérimentale, les principaux défis de l'optogénétique étaient en grande partie résolus et la technique en mesure d'être appliquée facilement et à large échelle. Grâce à cette méthode, les mécanismes neuronaux du comportement ont bénéficié de nombreux éclairages. Néanmoins, l'optogénétique seule ne peut fournir une autre information clé : une image de haute résolution du câblage des cellules contrôlées par la lumière à travers l'ensemble du cerveau.

Relier la représentation globale d'un système à ses composants est une des grandes aspirations de nombreux domaines scientifiques, même si cet objectif est souvent (et à raison) sacrifié. Séparer les composants d'un système complexe pour les étudier isolément a toujours joué un rôle essentiel en science, car sortir chaque composant de son contexte permet de déterminer quelles propriétés sont intrinsèques et ne dépendent pas des autres éléments. Mais dans le cas d'une structure étroitement interconnectée telle que celle du cerveau, démonter le système, comme séparer tous les fils d'une tapisserie, n'est pas toujours la meilleure stratégie pour comprendre la structure entière.

Depuis longtemps, pour marquer et étudier les cerveaux mammifères adultes malgré leur opacité, on les analyse *postmortem* en les « démontant » : on les découpe en tranches qui transforment le volume tridimensionnel de tissu cérébral en centaines de milliers de couches quasi bidimensionnelles. Ce processus est coûteux en temps et en argent, en particulier quand il s'agit d'étudier de nombreux cerveaux pour produire des résultats statistiques significatifs. En 2009, j'ai donc commencé à rechercher un moyen d'améliorer l'étude tridimensionnelle du cerveau.



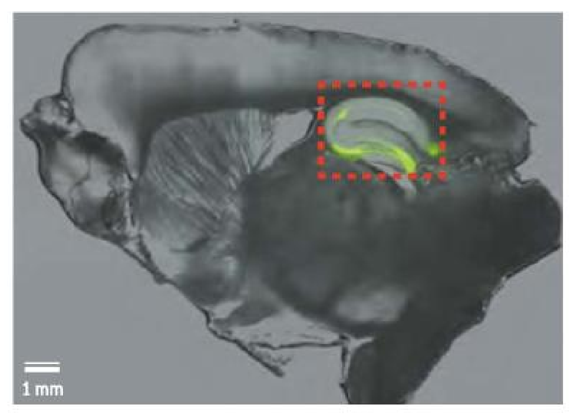
LE SYSTÈME NERVEUX D'UNE SOURIS transgénique de 4 mois exprimant une protéine fluorescente, observé à l'aide de la technique Clarity.

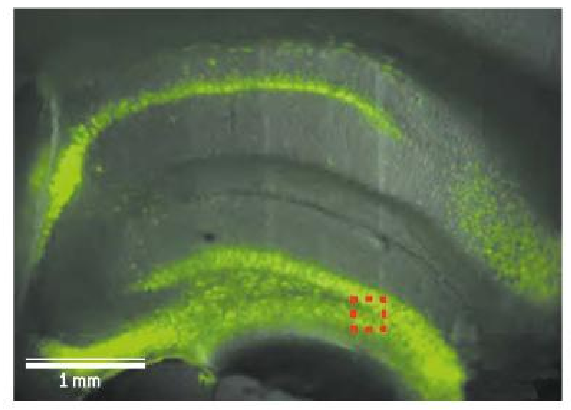
L'idée d'utiliser un gel était en fait déjà en germe quinze ans plus tôt. Au milieu des années 1990, j'avais voulu construire en laboratoire, à partir de cellules individuelles, des circuits imitant ceux du cerveau. Une piste consistait à semer des cellules souches neuronales sur des échafaudages de polymères et à les inciter alors, *via* une activation biologique adéquate, à se développer en neurones. Dans le cadre de ce projet, j'avais étudié la bibliographie scientifique et technique des hydrogels, qui semblaient particulièrement prometteurs pour servir d'échafaudages en vertu de leur biocompatibilité et de leur transparence.

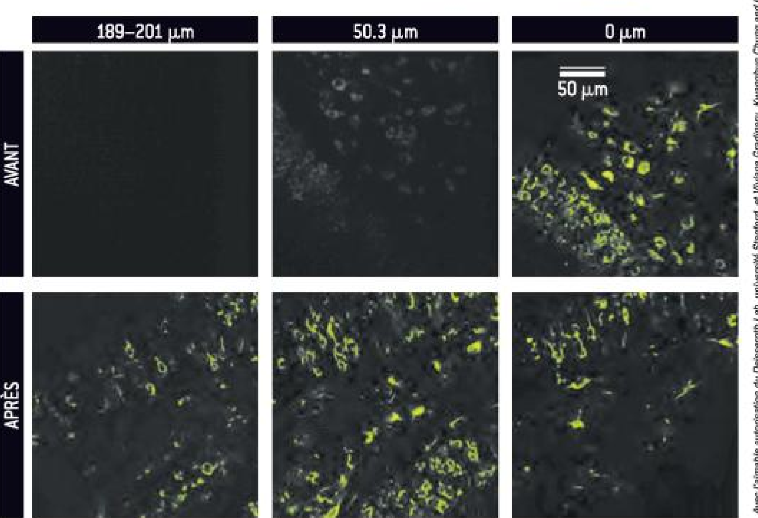
Les années suivantes, je n'ai finalement réalisé que des expériences pilotes simples, semant des cellules souches sur des échafaudages de polymères et les transformant en neurones, et n'ai jamais atteint une structure de type cérébral. Et consciencieusement, j'ai trimballé de laboratoire en laboratoire un dossier « hydrogels » de plus en plus poussiéreux rassemblant les articles que j'avais amassés sur le sujet. Mais l'échafaudage mental était en place, et l'idée a pris racine. Et grâce à l'investissement de plusieurs collègues talentueux, elle est devenue une stratégie exploitable pour construire un cerveau transparent.

Le déclic s'est produit en février 2010 : j'ai compris qu'il fallait utiliser le concept initial à l'envers. Au lieu de partir d'un hydrogel et d'y construire un cerveau, nous partirions d'un cerveau et y construirions un hydrogel. L'hydrogel servirait d'armature et préserverait la disposition des composants cérébraux importants pour nous, tels que les protéines et les acides nucléiques, mais permettrait l'élimination de tous les autres éléments qui bloquent la vision en profondeur. Il empêcherait le cerveau de s'effondrer en une soupe informe quand les composants structuraux moins intéressants seraient éliminés par dissolution ou digestion.

Les toutes premières expériences, qui ont joint la neurobiologie et la chimie des hydrogels et tenté de donner un début de forme à ce qui n'était qu'une simple possibilité, sont mieux appréciées à leur juste valeur avec le recul des années. Deux chercheuses créatives et audacieuses du laboratoire, Viviana Gradinaru et Charu Ramakrishnan, furent les premières à accepter de s'attaquer à ce projet colossal. Le risque d'échec était si élevé que j'avais décidé de ne pas impliquer tout le







Avec l'aimable autorisation du Deisseroth Lab, université Stanford, et Viviana Gradinaru, Kwanghun Chung and Charu Ramakrishnan

UN CERVEAU DE SOURIS fixé à l'aide d'un hydrogel transparent – et dont on a éliminé les éléments qui diffusent la lumière – devient si transparent que l'on y détecte, même en profondeur, des cellules marquées à l'aide d'une protéine fluorescente *(ci-dessus)*. Avant le traitement, les cellules situées à plus de 50 micromètres de profondeur étaient invisibles à cause de la diffusion lumineuse *(ci-contre, en haut)*. Une fois la fixation effectuée, les cellules sont détectables à des profondeurs de 200 micromètres et au-delà *(ci-contre, en bas)*.

laboratoire ; Viviana Gradinaru et Charu Ramakrishnan, qui avaient déjà connu de brillants succès avec d'autres projets, sauraient gérer le risque et la déception si le projet se révélait un échec.

Dès le début de l'année 2010, les deux biologistes ont cherché à rendre les neurones invulnérables aux dégâts que pourraient causer les agents utilisés pour détruire la structure tissulaire fine et les membranes cellulaires. En théorie, il suffisait de remplir les neurones avec un polymère durable adéquat et ils resteraient intacts si l'hydrogel les soutenait. Les chercheuses ont essayé diverses stratégies, dont l'introduction de gènes codant certaines enzymes qui rendent les neurones capables de fabriquer des polymères durables tels la chitine et la cellulose. La meilleure approche, une idée de Viviana Gradinaru, fut un processus permettant de fabriquer un autre biopolymère, la kératine, à l'intérieur des cellules. Viviana Gradinaru avait montré que dans les neurones en culture, la kératine produite protège la structure des cellules, et elle a supposé que dans un tissu cérébral gélifié (où l'on aurait stabilisé les neurones avec de la kératine, et où de l'hydrogel aurait été ajouté pour apporter un soutien supplémentaire), il serait possible d'éliminer les lipides avec du détergent afin de révéler les structures cérébrales cibles, suspendues dans l'hydrogel transparent.

Un chimiste à la rescousse

À ce stade, imprégner un cerveau entier d'hydrogel n'était qu'une idée. J'ai décidé d'accélérer le projet en cherchant à lui associer les compétences d'un ingénieur chimiste. Personne hors du laboratoire n'était au courant du projet. J'ai néanmoins fouillé dans mes courriels à la recherche de messages de jeunes chercheurs prospectant pour des bourses postdoctorales et susceptibles d'avoir l'expérience requise sur les hydrogels. C'est ainsi que j'ai repéré le nom de Kwanghun Chung, un jeune et talentueux ingénieur chimiste alors à Georgia Tech, à Atlanta. Kwanghun Chung avait eu vent de nos travaux sur l'optogénétique et les cellules souches, et souhaitait intégrer notre laboratoire.

Début mars 2010, nous avons eu notre première (brève) conversation téléphonique alors que j'assistais à une conférence dans l'Utah. J'étais tellement sûr d'être sur la bonne voie que je l'ai invité à rejoindre notre équipe sur le champ, sans même une visite du laboratoire ou un entretien *de visu* – une chose que je n'avais jamais faite (et que je n'ai pas réitérée depuis). Un ingénieur chimiste a ainsi surgi de nulle part dans l'équipe. Drôle d'époque pour un laboratoire de neurosciences !

Dès son arrivée, Kwanghun Chung s'est attelé au projet. Fin 2010, les trois membres de l'équipe avaient créé des blocs transparents de cerveau de souris dans lesquels on voyait clairement les cellules préservées, contenant de la kératine et ancrées dans de l'hydrogel, et ce à plusieurs centaines de microns à l'intérieur du tissu, une profondeur très supérieure à ce qui aurait été possible avec les autres méthodes existantes *(voir la figure page 50)*. Le premier hydrogel entièrement fonctionnel que Kwanghun Chung a produit était à base d'acrylamide, une substance couramment utilisée en laboratoire pour séparer les acides nucléiques ou les protéines en fonction de leur taille. Les hybrides gel-tissu produits à partir de ces travaux ont été conçus de telle sorte que l'on puisse y introduire directement des marqueurs fluorescents et autres indicateurs, afin de visualiser les protéines et structures préservées, comme les axones, sur plusieurs marquages successifs, et nous nous sommes aperçus que la kératine n'était pas indispensable pour préserver les structures cellulaires : l'hydrogel seul suffisait.

Avec d'autres approches – les méthodes 3DISCO et Scale, respectivement –, des travaux pionniers de Hans-Ulrich Dodt, du Centre pour la recherche sur le cerveau à l'université médicale de Vienne, et d'Atsushi Miyawaki, de l'institut Riken de science du cerveau, à Saitama, au Japon, avaient déjà donné des résultats encourageants, mais personne n'avait encore jamais atteint une telle transparence ni une telle accessibilité dans un cerveau mammifère adulte.

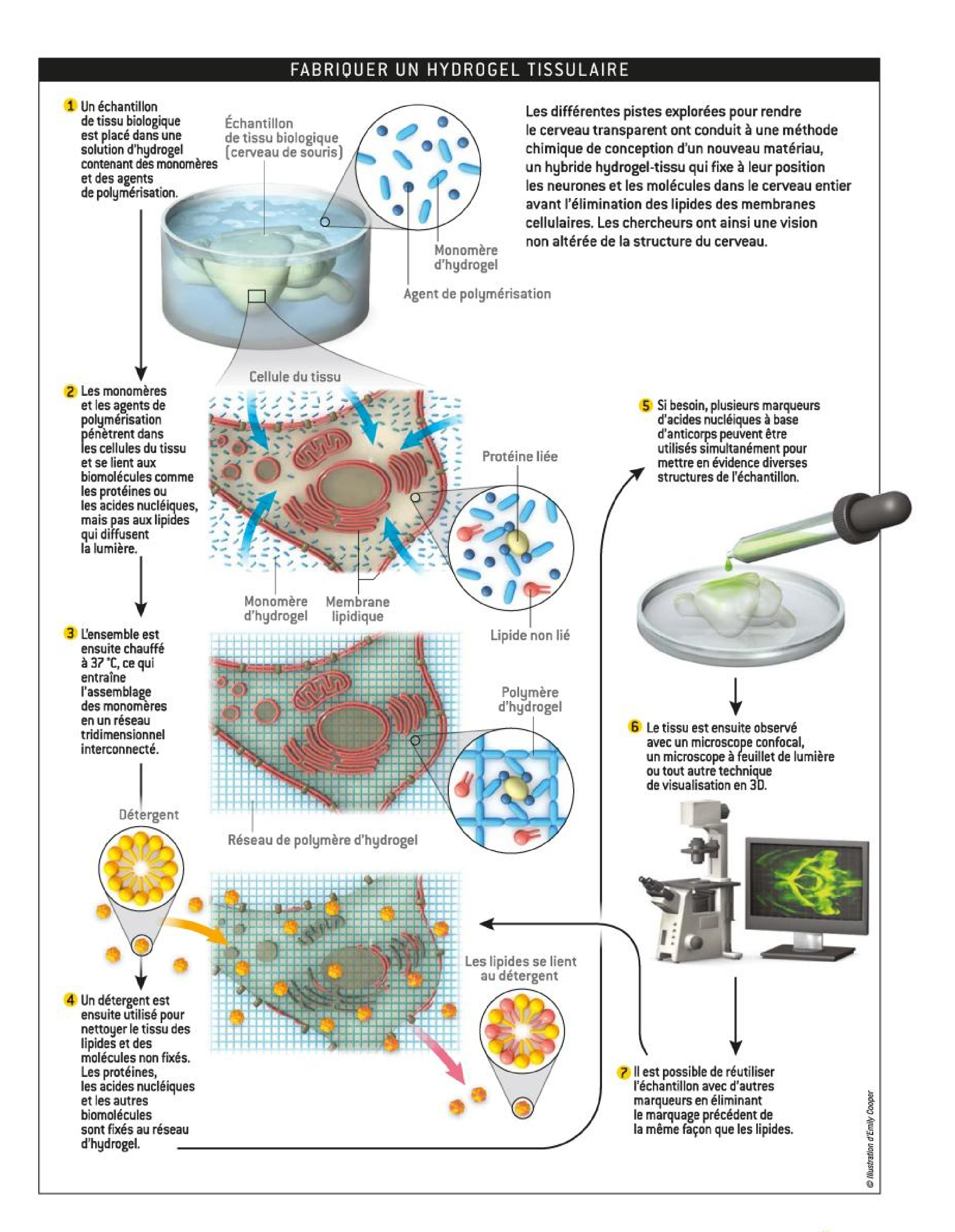
Personne n'avait encore jamais atteint **une telle transparence dans un cerveau** mammifère adulte

Nous avons nommé Clarity *(Clear Lipid-exchanged Acrylamide-hybridized Rigid Imaging/Immunostaining/In situ hybridization-compatible Tissue-hYdrogel)* cette version d'hydrogel à base d'acrylamide. De nombreuses variantes de Clarity sont parues depuis. Après notre publication de la technique en 2013, rien que la première version de Clarity a été adoptée pour diverses applications de science fondamentale et a également été utilisée à l'échelle clinique (notamment pour observer des cerveaux *postmortem* d'individus atteints d'autisme ou de la maladie d'Alzheimer), ainsi que sur la moelle épinière et le cerveau de souris (par exemple dans la découverte de voies de contrôle jusque-là inconnues du comportement anxieux). Plusieurs laboratoires dans le monde ont publié des articles où ils ont utilisé cette approche générale afin d'appréhender la structure du système nerveux, souvent en association avec l'optogénétique, et d'apporter des idées nouvelles pour comprendre les différences entre les câblages neuronaux fonctionnel et pathologique.

En quelques années, les techniques de fabrication des hydrogels tissulaires à l'intérieur de cerveaux ont fait de rapides progrès. Par exemple, dans la première version de la méthode, une étape consistait à imposer un champ électrique afin d'accélérer l'évacuation des particules de détergent électriquement chargées liées aux lipides. Il fallait un sérieux entraînement pour maîtriser cette étape, susceptible d'endommager les tissus si la tension appliquée était trop forte. Pour résoudre cette difficulté, nos collègues Raju Tomer, Brian Hsueh et Li Ye ont publié début 2014, avec l'aide de collaborateurs en Suède, une version simplifiée de cette étape, sans utilisation de champ électrique. La technique porte aujourd'hui le nom de Clarity passive. Ils ont aussi décrit une imagerie spécialisée pour hydrogel cérébral à l'aide d'une forme de microscopie rapide et de haute résolution dite à « feuillet de lumière ». Cette technique permet de scanner de gros volumes d'hydrogel (de deux à trois centimètres d'épaisseur) en les balayant à l'aide d'un plan lumineux (les feuillets de lumière) au lieu d'un point, comme en microscopie classique.

À ce stade, Viviana Gradinaru et Kwanghun Chung dirigeaient tous deux leurs propres laboratoires florissants (à Caltech et au MIT, respectivement). Leurs équipes et d'autres ont rapidement proposé de nouveaux développements. Viviana Gradinaru a mis au point une stratégie de Clarity passive convenant à des organismes entiers comme des rongeurs, nommée PARS. Elle a aussi publié, comme Kwanghun Chung, de nouvelles recettes pour les hydrogels, dénommées PACT et SWITCH.

Aujourd'hui, il existe toute une variété d'hydrogels tissulaires, décrits par des laboratoires du monde entier. Leur exploration expérimentale n'en est en revanche qu'à ses débuts. Kwanghun Chung et moi-même avons divulgué en 2013 une longue liste


FABRIQUER UN HYDROGEL TISSULAIRE
1 Un échantillon de tissu biologique est placé dans une solution d'hydrogel contenant des monomères et des agents de polymérisation.
Échantillon de tissu biologique (cerveau de souris)
Monomère d'hydrogel
Agent de polymérisation
Les différentes pistes explorées pour rendre le cerveau transparent ont conduit à une méthode chimique de conception d'un nouveau matériau, un hybride hydrogel-tissu qui fixe à leur position les neurones et les molécules dans le cerveau entier avant l'élimination des lipides des membranes cellulaires. Les chercheurs ont ainsi une vision non altérée de la structure du cerveau.
Cellule du tissu
2 Les monomères et les agents de polymérisation pénètrent dans les cellules du tissu et se lient aux biomolécules comme les protéines ou les acides nucléiques, mais pas aux lipides qui diffusent la lumière.
Protéine liée
Monomère d'hydrogel
Membrane lipidique
Lipide non lié
3 L'ensemble est ensuite chauffé à 37 °C, ce qui entraîne l'assemblage des monomères en un réseau tridimensionnel interconnecté.
Polymère d'hydrogel
Réseau de polymère d'hydrogel
Détergent
4 Un détergent est ensuite utilisé pour nettoyer le tissu des lipides et des molécules non fixés. Les protéines, les acides nucléiques et les autres biomolécules sont fixés au réseau d'hydrogel.
Les lipides se lient au détergent
5 Si besoin, plusieurs marqueurs d'acides nucléiques à base d'anticorps peuvent être utilisés simultanément pour mettre en évidence diverses structures de l'échantillon.
6 Le tissu est ensuite observé avec un microscope confocal, un microscope à feuillet de lumière ou tout autre technique de visualisation en 3D.
7 Il est possible de réutiliser l'échantillon avec d'autres marqueurs en éliminant le marquage précédent de la même façon que les lipides.
© Illustration d'Emily Cooper

de variantes d'hydrogel, des acrylates aux alginates et au-delà, et avec nos collaborateurs, nous explorons maintenant des pistes pour rendre ces polymères actifs, par exemple en les modifiant avec des éléments qui produiraient une conductivité électrique ou une réactivité chimique réglables, ce qui ouvrirait de nouvelles possibilités expérimentales.

Un autre défi concerne une propriété des hydrogels tissulaires : nous avons montré que leur fabrication entraîne un gonflement important des tissus cérébraux noyés. Cet effet n'est pas toujours un problème et reste compatible avec l'imagerie de haute résolution, qu'il concerne la technique Clarity originale ou d'autres développées plus récemment par d'autres groupes promouvant le gonflement (PACT/ePACT, ExM/proExM, MAP...). Mais comparer les cerveaux transparents à ceux des atlas universitaires exige une reconstitution précise et non perturbée du tissu d'origine. Nous avons donc développé une étape finale optionnelle qui ramène le tissu dilaté à sa taille initiale.

Au laboratoire, Li Ye et Will Allen ont également conçu un logiciel d'imagerie et d'analyse automatique à grande vitesse, téléchargeable et utilisable par tous. Le groupe de Marc Tessier-Lavigne, alors à l'université Rockefeller, s'en est ainsi servi pour sa nouvelle méthode, iDISCO, une version améliorée de 3DISCO. Mon groupe a aussi développé, dans un nouveau type d'hydrogel tissulaire, un marquage fluorescent de cerveaux entiers qui atteint en une fois de nombreux ARN. La capacité de marquer différents types de molécules, dont des acides nucléiques tels que l'ARN, se révèle un avantage particulier de l'approche par les hydrogels et ouvre des perspectives pour l'analyse de l'expression génique.

Combiner l'optogénétique et l'étude par hydrogel

Quand on compare l'esquisse du projet en 2010 et le résultat à peine six ans plus tard, le chemin parcouru est impressionnant. Un moteur clé de cette progression était de compléter l'optogénétique avec des informations structurales sur le cerveau entier. L'objectif est atteint et a fait l'objet de plusieurs publications, dont une en juin 2016. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le cortex préfrontal

L'ère de la « transparisation »

Rendre le cerveau transparent pour observer les cellules qui le constituent n'est pas une idée récente : la première méthode fut mise au point par l'anatomiste allemand Werner Spalteholz en 1914.

Son procédé, toujours utilisé, consiste à déshydrater l'organe, puis à l'immerger dans un mélange d'alcool benzylique et d'ester, le salicylate de méthyle. L'indice de réfraction de cette solution est équivalent à celui des protéines du tissu, ce qui rend ce dernier transparent à la lumière. Cette méthode n'est efficace que pour des échantillons de petite taille, mais en 2012, elle a inspiré à Frank Bradke, alors à l'institut Max Planck, à Munich, et son équipe la technique 3DISCO, où l'indice de réfraction est cette fois modifié à l'aide d'un solvant organique, le tétrahydrofurane, et d'éther de benzyle.

Cette technique permet de rendre transparent – « transpariser » – le cerveau d'une souris adulte en quelques heures. Un inconvénient est que la déshydratation du tissu éteint la fluorescence de protéines telles que la protéine verte GFP, très utilisée pour visualiser des neurones et leurs projections dans le système nerveux d'animaux transgéniques. Par ailleurs, le volume de l'échantillon traité diminue de 30 à 40 %, ce qui pose un problème si l'on souhaite mesurer la taille réelle des axones. Cela a conduit d'autres équipes à développer des techniques alternatives, telle Clarity, qui préserve mieux la fluorescence et la taille de l'échantillon.

Depuis, au moins une douzaine de techniques de « transparisation » ont vu le jour, reposant toutes sur le même principe : rendre le tissu transparent en l'imprégnant d'une solution de même indice de réfraction que ses protéines, souvent après l'avoir débarrassé des lipides membranaires, principaux responsables de la diffraction de la lumière. La technique 3DISCO a été peu à peu améliorée (une variante récente, Ultimate DISCO, maintient la fluorescence) et est à ce jour la moins coûteuse et la plus facile à mettre en œuvre. Nous avons aussi montré qu'elle se combine efficacement avec l'immunocytochimie, une méthode qui permet de visualiser des protéines spécifiques (par exemple présentes dans des neurones particuliers) grâce à des anticorps couplés à des molécules fluorescentes.

Toutefois, l'application de ces techniques à la compréhension de l'organisation des connexions cérébrales humaines sera complexe, car les microscopes actuels les plus puissants ne permettent pas d'observer des échantillons d'une épaisseur supérieure à deux ou trois centimètres (au-delà, l'objectif touche l'échantillon). Néanmoins, ces techniques devraient rapidement améliorer le diagnostic des cancers en permettant un examen plus précis des biopsies sur un large volume et non plus sur quelques coupes micrométriques des tissus.

– Alain Chédotal
Institut de la vision, Paris



LES PROJECTIONS visuelles dans le cerveau d'une souris, rendues transparentes à l'aide de la technique 3DISCO et observées au microscope à feuillet de lumière. Les axones provenant de l'œil gauche sont marqués en vert et ceux de l'œil droit en magenta.

du cerveau, une région qui régule divers processus cognitifs complexes et les émotions. En effet, les scientifiques espèrent qu'en élucidant la façon dont cette structure contrôle des comportements aussi divers, on comprendra mieux certains troubles psychiatriques tels que l'autisme et la schizophrénie.

Dans cette étude, nous avons tout d'abord utilisé l'optogénétique pour définir, au sein du cortex préfrontal de souris vivantes, une population de cellules actives pendant des expériences gratifiantes telles que la consommation de nourriture particulièrement savoureuse ou même de cocaïne (la population de cellules devait aussi contrôler des réponses comportementales appropriées à ces expériences). Nous avons ensuite procédé de même pour isoler une population de cellules réagissant à des expériences négatives (dissuasives). Enfin, à l'aide des derniers développements de Clarity, nous avons montré, sur les mêmes souris *postmortem*, que ces deux populations sont câblées différemment au sein du cerveau : les cellules positives envoient des connexions préférentiellement vers une structure cérébrale profonde, le noyau accumbens *(voir la figure pages 46 et 47)*, tandis que les cellules négatives sont davantage connectées à une autre structure profonde, l'habenula latérale. Ainsi, en conjuguant les deux approches – optogénétique et hydrogel tissulaire –, les nouvelles études des tissus biologiques entiers fournissent des données qui étaient inaccessibles jusqu'alors.

On ne comprend vraiment un système complexe que lorsque l'on est capable d'échanger de l'information entre les échelles locale et globale, qu'il s'agisse d'un cerveau entier ou d'une tapisserie finement ouvragée. En neuroscience, il est désormais possible de recueillir d'énormes quantités d'information détaillée sur la structure de l'organe entier, les composants moléculaires et l'activité des cellules. Peu à peu, une vision large et néanmoins nuancée de la fonction cérébrale se dessine. Et devrait se préciser encore ces prochaines années. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Ye *et al.*, **Wiring and molecular features of prefrontal ensembles representing distinct experiences**, *Cell*, vol. 165(7), pp. 1776-1788, 2016.

M. Belle *et al.*, **A simple method for 3D analysis of immunolabeled axonal tracts in a transparent nervous system**, *Cell Reports*, vol. 9, pp. 1191-1201, 2014.

K. Chung *et al.*, **Structural and molecular interrogation of intact biological system**, *Nature*, vol. 497, pp. 332-337, 2013.

A. Ertürk *et al.*, **Three-dimensional imaging of solvent-cleared organs using 3DISCO**, *Nature Protocols*, vol. 7(11), pp. 1983-1995, 2012.

K. Deisseroth, **Les neurones sous l'emprise de la lumière**, *Pour la Science*, n° 401, mars 2011.



LE ROUGE est en Chine traditionnellement la couleur du mariage et du bonheur. Mais les félicités conjugales ne seront bientôt plus accessibles à de nombreux Chinois.

Aux pays des **épouses disparues**

Christophe Z. Guilmoto

La préférence des familles pour les garçons entraîne en Chine, en Inde et en Europe orientale un déséquilibre du *sex-ratio* à la naissance. Une véritable bombe à retardement démographique car, arrivés à l'âge du mariage, les hommes condamnés au célibat vont bientôt se compter par millions.

L'ESSENTIEL

- Dans certains pays d'Asie et en Europe orientale, le *sex-ratio* à la naissance atteint jusqu'à 130 garçons pour 100 filles.
- Ce déséquilibre s'explique par le sexisme des familles, qui favorisent la naissance des garçons grâce à l'avortement sélectif.
- Pour ces générations, le déséquilibre du *sex-ratio* s'accentuera encore à l'âge adulte, car les célibataires forcés encombreront longtemps le marché matrimonial.
- Les gouvernements concernés redoutent des crises sociales et culturelles.

Depuis près de trente ans, la part des naissances masculines a peu à peu augmenté dans le monde et les hommes continuent de dominer sur la planète, laquelle devrait pourtant compter une majorité de femmes en raison de leur longévité supérieure. S'agirait-il d'un phénomène biologique affectant le monde entier ? Pas du tout : cette hausse progressive de la proportion des naissances de garçons n'a concerné en réalité qu'un petit nombre de pays en Asie et en Europe orientale, à commencer par les deux plus peuplés, et a épargné les autres qui sont restés proches de la moyenne biologique : 105 garçons pour 100 filles *(voir l'encadré page 59)*.

Les chiffres disponibles montrent en effet que, depuis les années 1980, la proportion des naissances de garçons s'est notablement accrue en Chine, en Inde (dans les États du nord-ouest) et en Corée du Sud (de 1980 à 1995). Dans ces pays, ce rapport de masculinité a progressivement dépassé 110 pour atteindre parfois des valeurs supérieures à 120 ou 130 dans certaines régions, par exemple le Punjab indien.

Dans les années 1990, à la suite de l'effondrement des régimes communistes, le même phénomène est apparu également en Europe orientale (à l'ouest des Balkans, en Albanie, au Kosovo et au Monténégro et dans le sud du Caucase, en Azerbaïdjan, Arménie et Géorgie). Cette progression de la masculinité des naissances en Europe de l'Est, longtemps ignorée ou niée par les autorités locales, a fait voler en éclat le mythe du caractère purement asiatique des avortements sélectifs. Elle est étroitement reliée à la résurgence des institutions familiales dans les anciens pays communistes.

Éliminer les filles : un choix de courte vue

Tous les pays affectés ont en commun une forte préférence pour les garçons, qui déséquilibre de manière singulière les choix reproductifs des parents aux dépens des filles, moins désirées. Des motifs pragmatiques expliquent ce sexisme : le mode de transmission des terres, le coût élevé du mariage des filles ou le soutien aux personnes âgées revenant aux garçons ;

voire des raisons religieuses liées au rôle des descendants mâles dans les rites funéraires ou le culte des ancêtres.

Mais pour les anthropologues, il s'agit moins là d'un étroit calcul économique que d'une disposition culturelle découlant d'un système de parenté patrilinéaire et patrilocale qui fonde la famille autour de la descendance masculine. Ce système privilégie inévitablement la cohabitation des parents avec des garçons mariés qui perpétuent la lignée, alors que les femmes rejoignent au contraire le ménage de leur époux. Ce qui fait dire en Asie qu'élever une fille revient à arroser le jardin du voisin, puisqu'elle appartiendra à la maisonnée de son conjoint après le mariage.

Ainsi, dans un système foncièrement patriarcal, il peut sembler logique pour un couple de vouloir s'assurer la présence d'un garçon pour les diverses raisons sociales ou économiques citées plus haut, surtout s'il a déjà donné naissance à plusieurs filles de suite. C'est une manifestation typique de la rationalité démographique que la maîtrise de la fécondité et l'avortement sélectif ont rendue possible : fixer le nombre des enfants, mais également leur sexe.

Le niveau moyen de fécondité allant se réduisant (il est inférieur à deux enfants par femme dans la plupart des pays évoqués ici), le risque de rester sans garçon s'élève très rapidement si l'on s'en remet au hasard biologique et il concerne de fait plus de un quart des familles quand elles ne veulent pas plus de deux descendants.

Toutefois, l'élimination généralisée des filles avant la naissance relève d'un choix decourte vue puisqu'elle va inévitablement perturber l'équilibre des sexes dans la population adulte quelque vingt à trente ans plus tard. Elle correspond même à un cas d'école de la tragédie des biens communs, situation décrite par les écologues quand tous les comportements opportunistes des individus conduisent ultérieurement à un désastre collectif du fait de la surexploitation des ressources partagées. Les forêts, l'air pur ou l'eau potable en sont des exemples emblématiques. Dans le cas qui nous intéresse, c'est l'équilibre entre les sexes qui sera la victime future des petits arrangements d'aujourd'hui avec la biologie.

L'AUTEUR



Christophe Z. GUILMOTO est démographe au CEPED (Centre Population et développement), à Paris, et directeur de recherche à l'IRD (Institut de recherche pour le développement). Il travaille depuis plusieurs années sur les déséquilibres de sexe dans le monde.

L'équilibre entre les sexes sera la victime future des petits arrangements d'aujourd'hui avec la biologie

La faiblesse des statistiques rend encore aujourd'hui malaisée l'évaluation chiffrée de l'intensité de la sélection prénatale dans le monde. Mais les chercheurs ont dès à présent essayé de représenter ce que seront les conséquences des comportements contemporains.

Plusieurs scénarios possibles

Avec une forte fiabilité, il est en effet possible de projeter les effectifs démographiques actuels pour estimer ce que seront les populations adultes des décennies à venir et d'imaginer ainsi l'ampleur du déséquilibre à l'âge du mariage. Pour ce faire, il convient dans un premier temps de pondérer les effectifs des adultes par les taux de nuptialité par âge et sexe *(voir la figure page 60)*. Les calculs reproduits ici portent sur la Chine et l'Inde, les deux pays les plus peuplés du monde, et parmi les plus affectés par la sélection prénatale.

Les chiffres reposent sur deux scénarios : un premier envisage une réduction rapide du *sex-ratio* à la naissance (aujourd'hui déséquilibré) et un retour à la normale en 2020 (pour l'Inde comme pour la Chine). Quoique résolument optimiste, ce scénario n'est pas pour autant fantaisiste, puisqu'il correspond à ce qui a été observé en Corée du Sud : le *sex-ratio* à la naissance, après une forte hausse durant les années 1980, a commencé à baisser à partir de 1995 et il est aujourd'hui repassé à un niveau biologique. On ignore encore les raisons exactes de ce retour à la normale en Corée du Sud (simple effet du changement social et de l'amélioration de la condition féminine, ou impact des politiques introduites pour interdire la sélection prénatale ?) et si elles s'appliqueront à la Chine ou l'Inde.

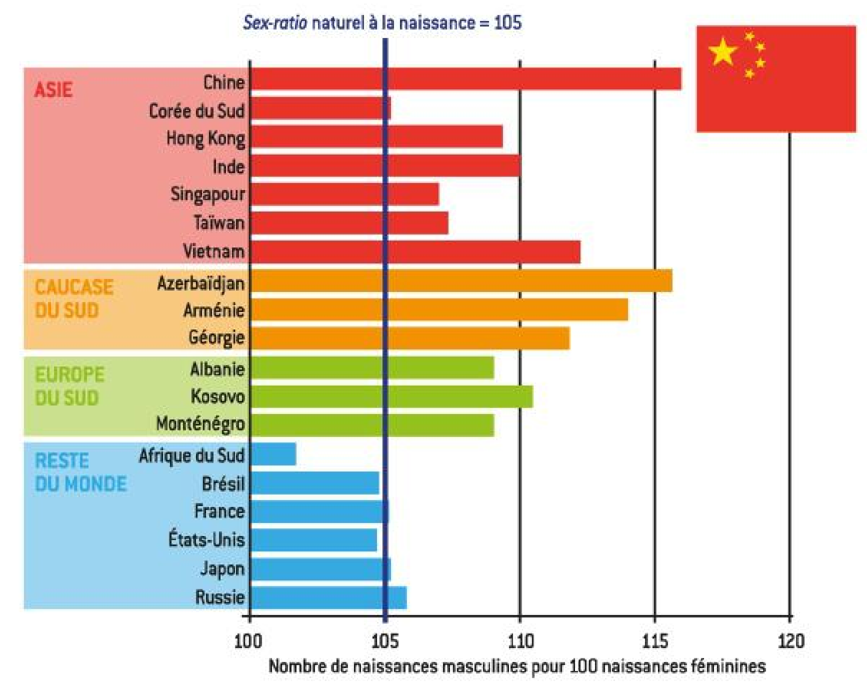
Un second scénario reconstitue ce qu'auraient été ces deux populations en l'absence de déséquilibre des naissances depuis les années 1980. Il permet d'évaluer l'effet propre à la hausse contemporaine de la masculinité des naissances.

On constate sans surprise la hausse inévitable du surplus d'hommes parmi les adultes, excédent qui atteindra son pic en 2025 dans les deux pays concernés ; ce pic découlant de celui du sex-ratio des

LA MASCULINITÉ DES NAISSANCES : LE BIOLOGIQUE ET LE SOCIAL

L'une des premières découvertes de la statistique démographique fut le léger surplus de naissances masculines observé par John Graunt dans la population de Londres au XVIIe siècle. Tous les chiffres recueillis par l'état civil depuis cette date ont depuis confirmé ce surcroît masculin. Cet invariant biologique, propre à l'espèce humaine, ne connaît que de faibles fluctuations autour des valeurs de 104-106 naissances masculines pour 100 naissances féminines. Seules les populations originaires d'Afrique subsaharienne – qu'il s'agisse de pays comme l'Afrique du Sud ou des Afro-Américains aux États-Unis – se démarquent légèrement avec un *sex-ratio* à la naissance souvent égal ou inférieur à 103. Pourquoi naturellement naît-il plus de garçons que de filles ? La réponse est loin d'être claire, l'explication proprement biologique de ce niveau restant assez floue, mêlant des observations évolutionnistes sur la surmortalité des garçons qui aurait dans le passé requis un correctif biologique et des considérations encore mal établies sur les liens contemporains avec l'âge à la procréation ou les effets environnementaux.

Au sujet de l'augmentation récente de la proportion de naissances masculines en Asie et en Europe orientale *(voir le tableau ci-dessous)*, on trouve des explications sociologiques beaucoup plus convaincantes : on observe dans ces sociétés patriarcales un réel sexisme familial, exacerbé par la baisse de la fécondité, qui pousse les parents à faire des choix drastiques sur la composition sexuée de leur progéniture. Un choix rendu possible grâce aux techniques de diagnostic prénatal développées depuis les années 1970 (amniocentèse, échographie, techniques d'analyse sanguine précoce…) qui permettent aux familles, *via* l'avortement sélectif, d'éviter une naissance si le sexe du fœtus ne leur convient pas.



naissances, vingt ans plus tôt. La courbe devrait ensuite s'abaisser si, et seulement si, la masculinité des naissances diminue bien d'ici à 2020. Dans le cas contraire, le *sex-ratio* adulte se maintiendrait aux niveaux actuels, proches respectivement de 110 et de 120 en Inde et en Chine, et conduirait d'ailleurs à une crise démographique encore plus grave. Cette hypothèse catastrophiste nous paraît improbable, car un aussi fort déséquilibre sera en effet « insoutenable » à moyen terme pour des raisons démographiques et sociales (non-reproduction familiale).

Pour autant, comme on le voit sur les prévisions présentées ici, le *sex-ratio* des adultes ne devrait pas revenir à un équilibre parfait après la crise et restera proche de 105 en Chine comme en Inde, en dépit de l'effet de la mortalité des garçons depuis la naissance qui devrait l'abaisser. Pire : quand on examine les chiffres du *sex-ratio* adulte après 2065 de ces deux pays en l'absence de sélection prénatale du sexe, on note une hausse sensible. D'où vient cette augmentation ? D'un effet complexe des structures démographiques, lié notamment à la baisse prévue du nombre des naissances et aux écarts d'âge au mariage, les hommes épousant des femmes plus jeunes, nées par conséquent dans des générations moins nombreuses. Un exemple pour fixer les idées : entre 2000 et 2010, la population

masculine des 25-29 ans en Inde a augmenté de 9,2 millions, tandis que la population féminine des 20-24 ans (leurs partenaires potentielles) n'a crû que de 7,6 millions.

Ce calcul du *sex-ratio* reste imparfait. Il est fondé sur un régime de nuptialité par âge standard, fondé sur ce que l'on observerait en l'absence de sélection prénatale. Or le déséquilibre des sexes qui amènera chaque année un excès de jeunes gens créera un volant de célibataires « forcés » ayant échoué dans leur projet nuptial, et ce volant s'accumulera au fil du temps.

Ces vieux garçons involontaires retenteront donc de se marier plus tard (plus âgés) et viendront encombrer ce que sociologues et économistes appellent depuis Pierre Bourdieu et Gary Becker le marché matrimonial. On peut alors appliquer la théorie des queues : le temps d'attente dans un système, ici le marché matrimonial, dépend en effet non seulement du nombre d'entrants, à savoir les jeunes nouvellement prêts à se marier, mais également du rythme des sorties, à savoir le nombre de nouveaux mariages. Or il n'y aura pas plus d'unions qu'il n'y a de femmes et les hommes seront donc condamnés à la patience.

Ce déséquilibre, *marriage squeeze* en anglais, peut être simulé par des calculs plus complexes. On peut en effet estimer le nombre de célibataires qui essaieront de convoler chaque année et en calculer une nouvelle fois le *sex-ratio*. L'effet d'engorgement est cumulatif, chaque cohorte de naissances augmentant le nombre de nouveaux candidats à l'union, alors qu'un grand nombre d'hommes plus âgés n'auront toujours pas trouvé d'épouse.

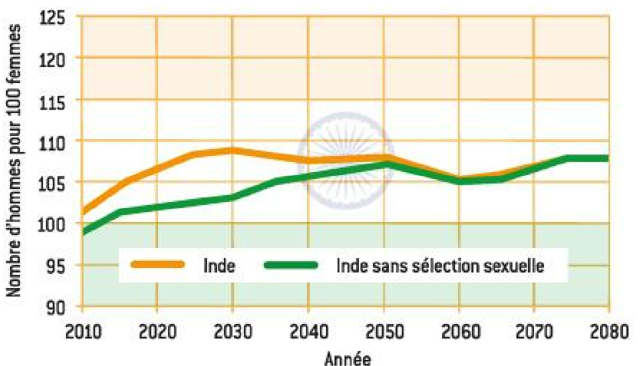
Les chiffres de ce déséquilibre des mariages à venir *(voir la figure en bas à droite)* sont largement plus inquiétants que les prévisions démographiques usuelles. Le pic de la crise est atteint plus tard (après 2030) et

PRÉVISIONS DÉMOGRAPHIQUES...

La détermination de certaines populations, notamment en Chine et en Inde, à manipuler la biologie en influant artificiellement sur la composition par sexe de sa progéniture est sans doute une victoire à la Pyrrhus. Cette profusion de garçons qui deviendront adultes quelques décennies plus tard va en effet mener à un inévitable déficit de conjointes potentielles comme le montrent nos projections qui s'appuient sur deux scénarios : un premier prenant en compte le déséquilibre des naissances avec l'hypothèse que ce dernier s'estompe vers 2020 et un second correspondant aux structures démographiques théoriques de ces pays, s'il n'y avait jamais eu d'avortements sélectifs. À partir de là, on peut calculer les effectifs par sexe dans le futur. Pour dessiner une première idée des effets sur le mariage, il suffit de prendre ces chiffres et de leur appliquer le taux de nuptialité par âge et par sexe. Ce taux correspond au nombre de premières unions qui devraient avoir lieu en fonction des structures démographiques et selon des modèles de nuptialité qu'on peut raisonnablement pronostiquer dans le futur (on peut ainsi pronostiquer un retard graduel de l'âge au mariage à cause de l'allongement de la scolarité, particulièrement en Inde).

***Sex-ratio* des adultes pondéré par la nuptialité**

Nombre d'hommes pour 100 femmes
125
120
115
110
105
100
95
90
Chine
Chine sans sélection sexuelle
2010 2020 2030 2040 2050 2060 2070 2080
Année



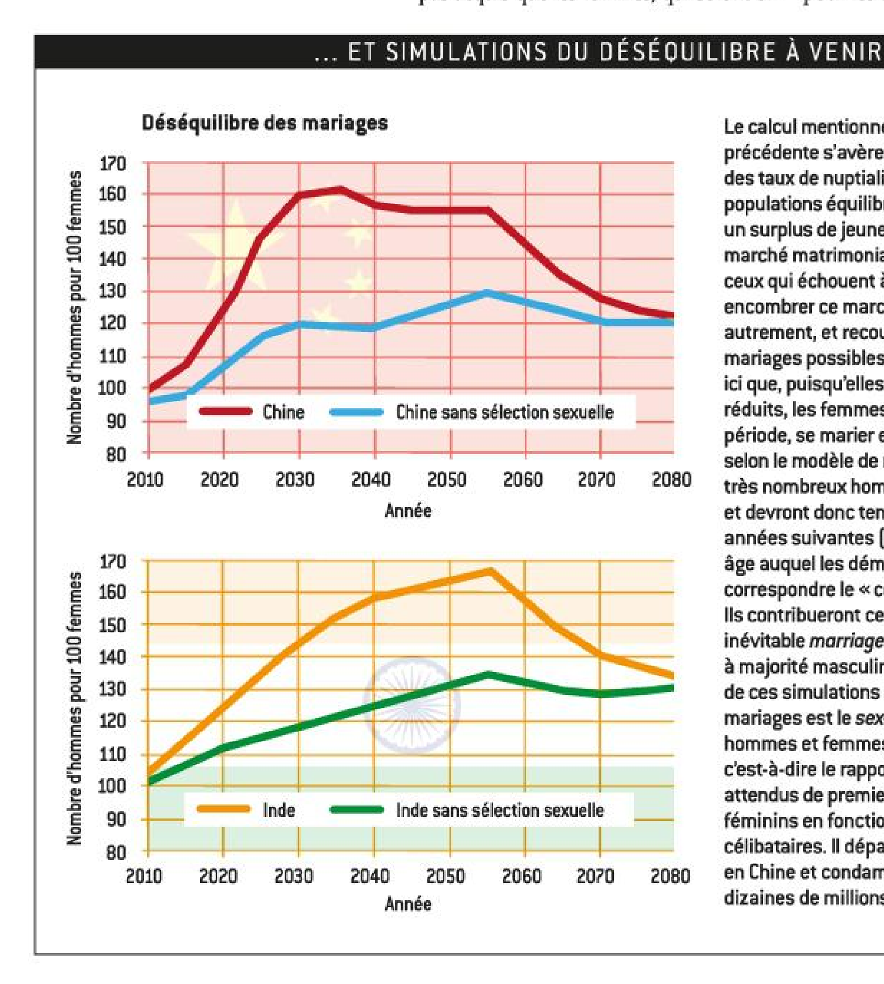
risque de persister jusqu'en 2055, c'est-à-dire longtemps après la naissance des générations les plus disproportionnées. On atteint alors des *sex-ratios* de 160, soit un excès de 60 % d'hommes cherchant à se marier par rapport aux femmes ! Cela signifie que près de 40 % des hommes devront retarder leurs noces, alors que les femmes n'auront, en théorie, qu'à choisir le meilleur parti parmi tous les candidats.

Le surplus masculin restera très accentué durant au moins quatre décennies sous l'effet du cumul de ces générations déséquilibrées à la naissance et sera en outre renforcé par l'inégalité structurelle évoquée plus haut. Ce n'est en réalité que vers 2080 que les chiffres rejoindront les prévisions démographiques en l'absence de sélection prénatale du sexe.

L'arithmétique démographique est impitoyable et l'on sait déjà que le retard du mariage masculin ne suffira pas à absorber le surplus d'hommes. Il n'est d'ailleurs pas acquis que les femmes, qui seront en position favorable sur un marché où elles seront très demandées, accepteront d'épouser des hommes plus âgés, c'est-à-dire qu'elles considéreront que les ressources accumulées par ces derniers (éducation, niveau de salaire, biens immobiliers, position sociale, etc.) compensent la différence d'âge accrue.

Quel salut hors du mariage ?

Un grand nombre d'entre eux devront renoncer au mariage, dans des proportions comprises entre 10 et 15 % selon les pronostics, ce qui représente plusieurs dizaines de millions de célibataires forcés. À moins d'envisager quelques hypothèses peu vraisemblables, que l'on évoquera plus loin, les hommes devront attendre ou renoncer, car après des années de déséquilibres à la naissance, il manquera toujours le nombre requis d'épouses potentielles pour les cohortes actuelles.



Le calcul mentionné dans l'encadré de la page précédente s'avère trompeur, car il repose sur des taux de nuptialité observés dans des populations équilibrées. Dès que l'on observe un surplus de jeunes hommes entrant sur le marché matrimonial, il faut envisager que ceux qui échouent à se marier vont venir encombrer ce marché. Il faut donc procéder autrement, et recourir à des simulations des mariages possibles dans le futur. On suppose ici que, puisqu'elles sont en effectifs plus réduits, les femmes pourront, durant chaque période, se marier exactement comme prévu selon le modèle de nuptialité. En revanche, de très nombreux hommes ne pourront se marier et devront donc tenter leur chance durant les années suivantes (c'est-à-dire avant 50 ans, âge auquel les démographes font correspondre le « célibat définitif »).
Ils contribueront ce faisant à créer cet inévitable *marriage squeeze* dans les pays à majorité masculine. Le chiffre dérivé de ces simulations du déséquilibre des mariages est le *sex-ratio* des célibataires hommes et femmes essayant de se marier, c'est-à-dire le rapport entre les nombres attendus de premiers mariages masculins et féminins en fonction des effectifs de célibataires. Il dépassera 160 en Inde comme en Chine et condamnera au célibat des dizaines de millions d'hommes.

En 2041, la Chine comptera 41 millions d'hommes en trop sur le marché du mariage

Cette augmentation du célibat masculin pourrait sembler un détail anecdotique. Après tout, on a déjà observé un tel déséquilibre, mais inversé, en France après la Première Guerre mondiale, en raison des pertes masculines. Cependant, l'amplitude prévue dans les déficits féminins à venir est d'un tout autre ordre de grandeur.

D'ailleurs, le pronostic de ce futur encombrement du marché matrimonial a déjà conduit différents observateurs à produire des hypothèses diversement réalistes sur les conséquences potentielles de la hausse de la masculinité.

Certains pays ont tenté, à l'instar de la Corée du Sud et de Taïwan, qui attirent des épouses de Chine ou du Vietnam, de combler ces déficits par des migrations de jeunes femmes. Nous ne disposons pas de chiffres pour évaluer l'ampleur de ces déplacements, d'autant que s'y mêlent les flux importants de migrations professionnelles féminines (en Chine).

À l'échelle d'une petite région, cela est sans doute possible si le système des unions, et notamment les contraintes endogamiques de caste ou d'ethnie, se relâche. Mais c'est totalement impossible à l'échelle de la Chine ou de l'Inde, qui, en raison de leurs populations considérables (1,371 milliard et 1,314 milliard), auraient besoin de toutes les femmes célibataires des pays voisins ! On peut estimer en effet que, à partir de 2040, environ 2,5 millions de tentatives de mariages masculins échoueront chaque année en Chine comme en Inde. Et certains chercheurs prévoient un excédent total de 41 millions d'hommes âgés de plus de 22 ans sur le marché matrimonial chinois en 2041.

Le départ en migration des hommes non mariés est, pour la même raison démographique, fort peu vraisemblable. D'autres ajustements pourraient tenir au remariage féminin (les femmes pouvant épouser plusieurs hommes différents durant leur vie), voire au mariage entre hommes. Mais il s'agit de scénarios peu vraisemblables dans la Chine ou l'Inde d'aujourd'hui. Qui plus est, leur effet démographique resterait de toute façon modeste.

La situation est totalement inédite, car un tel déséquilibre entre les sexes, de cette ampleur et de cette durée, n'a jamais été observé dans le passé. Il n'est donc pas facile d'entrevoir des scénarios de sortie de crise qui soient sociologiquement raisonnables. À la différence du régime occidental dans lequel le célibat est une « soupape de sûreté » acceptable et où une diversité de formes d'union prévaut depuis longtemps, les sociétés en Asie qui pratiquent les avortements sélectifs sont fondées sur un régime patriarcal rigide reposant sur un mariage universel : l'union hétérosexuelle y reste une institution incontournable où tout le monde, y compris les prêtres, est censé prendre conjoint et avoir des enfants.

Des hommes doublement défavorisés

D'où les funestes prédictions avancées par certains : hausses des violences faites aux femmes, de la prostitution, du trafic humain et des crimes en général, mais également des risques accrus d'épidémies sexuellement transmissibles, de militarisation, voire de conflits sectaires ou internationaux. Les effets positifs semblent pour l'instant limités, même si certains travaux suggèrent que le célibat pourrait forcer les hommes à étudier plus longtemps, à

16 HOMMES POUR 10 FEMMES ! Tel sera le *sex-ratio* sur les marchés matrimoniaux en Inde et en Chine au milieu du siècle. Le statut des femmes en sera-t-il amélioré ? Rien n'est moins sûr.



travailler plus dur et à davantage épargner pour se constituer un pécule pour le mariage, comportements dont les implications peuvent être bénéfiques à l'échelle des pays dans leur ensemble.

Quelles que soient les conséquences effectives de cette crise, négatives ou positives, il est certain que le système social qui l'a engendré, inégal pour les sexes et reposant sur des formes archaïques de patriarcat, en sera déstabilisé. Dans l'immédiat, ce sont les hommes qui vont en souffrir même si ces générations sont parfaitement innocentes du déséquilibre démographique délibérément provoqué par la génération de leurs parents.

Les études de terrain montrent qu'un tri sans merci s'opère déjà entre les candidats au mariage dans les zones affectées par un déficit féminin. Les critères socioéconomiques les plus classiques (l'éducation, les biens ou les terres possédés, les revenus, etc.) nourrissent les fortes tendances hypergamiques selon lesquelles les femmes en Asie épousent des hommes de condition supérieure et se servent donc de leur union comme d'un ascenseur social. Cela signifie que les hommes marginalisés pour des raisons ethniques, géographiques, physiques ou socioéconomiques seront les premiers exclus du marché matrimonial. Les risques de célibat définitif envisagés précédemment seront par conséquent deux à trois fois plus élevés parmi eux et il n'est pas invraisemblable d'imaginer une relégation des vieux garçons contraints en certains villages ou quartiers défavorisés. Le mariage, autrefois universel, deviendra une étape incertaine pour les hommes et représentera un nouveau marqueur de réussite sociale.

De la même façon, l'accès au marché sexuel va se restreindre progressivement pour les hommes des milieux défavorisés, hormis dans un cadre strictement commercial. Cela rappelle inévitablement le roman *Extension du domaine de la lutte* dans lequel Michel Houellebecq imagine la détérioration croissante de la position des hommes, illustrée par leur accès de plus en plus difficile aux femmes et par conséquent à la sexualité.

Il semblerait certes plus optimiste de prévoir des transformations graduelles rapprochant les sociétés asiatiques des systèmes sociaux occidentaux, où le célibat, le mariage tardif, la cohabitation ou l'union entre personnes du même sexe donnent une très grande flexibilité aux modèles familiaux et permettent d'amortir socialement bien des fluctuations démographiques.

Une victoire à la Pyrrhus

Mais à l'inverse de la baisse universelle de la fécondité qui a suivi l'exemple européen, rien ne montre jusqu'à présent de convergence globale en matière de modèle familial. On ne peut échapper à l'ironie de ce développement imprévu au sein de la population asiatique. Le continent a en effet été salué pour la baisse successive de sa mortalité et de sa fécondité, et du formidable « bonus démographique » qui en a résulté : une croissance sans précédent de la part relative de sa population active qui a fortement consolidé l'élan de développement rapide des dernières décennies. Ce modèle est désormais mis à mal par l'apparition d'un malus démographique, lié à l'explosion de la population masculine, dont on ne connaît encore que les contours démographiques.

Les gouvernements des pays affectés en Asie se sont progressivement mobilisés face au profond dérèglement des structures des populations qui s'annonce. Mais relever ce défi imposera de modifier des façons de voir et des habitudes de vie bien ancrées comme le modèle du mariage universel. Un changement de monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Z. Guilmoto, **La masculinisation des naissances. État des lieux et des connaissances**, *Population*, vol. 70(2), pp. 201-264, 2015.

The marriage squeeze in India and China. Bare branches, redundant males, *The Economist*, 18 avril 2015.

C. Z. Guilmoto et G. Duthé, **La masculinisation des naissances en Europe orientale**, *Population & Sociétés*, vol. 506, pp. 1-4, 2013.

K. Gilles et C. Feldman-Jacobs, **When technology and tradition collide : From gender bias to sex selection**, Population Reference Bureau, 2012.

C. Z. Guilmoto, **Skewed sex-ratios at birth and future marriage squeeze in China and India, 2005-2100**, *Demography*, vol. 49(1), pp. 77-100, 2012.

C. Z. Guilmoto, **La parenté, le marché et l'État face à l'aversion pour les filles en Asie**, *Hérodote*, vol. 136, pp. 166-184, 2010.





L'énigme de la durée de vie du **neutron**

Geoffrey Greene et Peter Geltenbort

Plus de 8 secondes d'écart : les diverses mesures de la durée de vie moyenne du neutron conduisent à deux résultats discordants. Cette divergence résulte-t-elle de simples erreurs expérimentales ou traduit-elle un mystère plus profond ?

Bill Mayer

Par chance pour la vie sur Terre, la plus grande partie de la matière n'est pas radioactive. Cela nous semble aller de soi, mais ce fait est étonnant. En effet, le neutron, l'un des deux constituants du noyau atomique (l'autre étant le proton), est sujet à désintégration radioactive. Au sein du noyau atomique, un neutron peut subsister très longtemps sans jamais se désintégrer. En revanche, lorsqu'il est à l'état libre, il se transforme en un proton par désintégration radioactive au bout d'une durée moyenne égale à un quart d'heure environ. Cet « environ » traduit une lacune dans la compréhension de cette particule par les physiciens. En effet, malgré tous nos efforts, nous ne sommes pas parvenus à mesurer précisément la durée de vie moyenne du neutron libre.

Cette incertitude sur la valeur de la durée de vie du neutron n'est pas simplement embarrassante pour nous autres expérimentateurs ; elle l'est aussi pour les scientifiques qui cherchent à comprendre l'Univers. La désintégration du neutron est l'un des exemples les plus simples d'« interaction faible », l'une des quatre interactions fondamentales (avec la gravitation, l'électromagnétisme et l'interaction forte). Pour vraiment comprendre l'interaction faible, il nous faut connaître avec précision la durée de vie moyenne du neutron. De plus, la valeur de cette durée de vie fut déterminante dans la formation des éléments chimiques les plus légers juste après le Big Bang. Les cosmologistes voudraient calculer les abondances attendues des différents éléments et les comparer aux mesures astrophysiques : un accord confirmerait notre tableau théorique, et un désaccord suggérerait que des phénomènes non encore découverts ont joué. Or établir une telle comparaison nécessite de connaître la durée de vie du neutron.

Il y a plus de dix ans, deux groupes indépendants d'expérimentateurs, l'un en France, sous une direction russe, et l'autre aux États-Unis, ont tenté de la mesurer précisément. L'un de nous (Peter Geltenbort) faisait partie de la première équipe, et l'autre (Geoffrey Greene) était membre de la seconde. Comme nos collègues, nous avons été étonnés et un peu déconcertés de constater que nos résultats divergeaient nettement.

Certains théoriciens ont suggéré que la différence était due à l'existence d'une physique exotique, c'est-à-dire que certains neutrons des expériences se seraient transformés en des particules inconnues à ce jour, et que cela aurait eu des effets divergents sur les résultats des différentes expériences. Quant à nous, nous soupçonnions une explication plus terre à terre : l'un des groupes, ou les deux, avait simplement pu commettre une erreur ou, plus vraisemblablement, avait surestimé l'exactitude de son expérience.

Dans l'espoir de résoudre ce désaccord, l'équipe américaine a récemment achevé une longue étude méticuleuse de la source dominante d'incertitude dans son expérience. Mais, loin de régler le problème, ces travaux ont confirmé le résultat initial. Qui plus est, d'autres chercheurs ont ultérieurement confirmé les résultats de l'équipe de Peter Geltenbort. Cette divergence a encore accru notre perplexité.

L'ESSENTIEL

- **Le neutron est, à l'état libre, instable : il se désintègre à un instant aléatoire, en moyenne au bout d'un temps égal à près de 15 minutes.**
- **Les résultats expérimentaux obtenus par deux méthodes différentes sont en conflit sur la durée de vie moyenne du neutron, dont la valeur précise importe pour diverses questions de physique et de cosmologie.**
- **Ce désaccord pourrait être dû à des incertitudes expérimentales mal évaluées ou, plus intrigant, à l'existence de phénomènes physiques non prévus.**

Une désintégration due à l'interaction faible

En théorie, mesurer la durée de vie du neutron devrait être simple. La physique de la désintégration correspondante est bien comprise, et nous disposons de techniques perfectionnées pour étudier le processus. Nous savons par exemple que si une particule a la possibilité de se transformer en une ou plusieurs particules de masse inférieure tout en conservant des caractéristiques telles que charge électrique et moment cinétique de spin, elle le fera. Les neutrons libres présentent une telle instabilité. Lors du processus, une « désintégration bêta », le neutron se transforme en un proton, avec l'émission d'un électron et un antineutrino (l'homologue du neutrino pour l'antimatière). La masse totale des particules produites est légèrement inférieure à celle du neutron initial, mais la charge, le moment cinétique et d'autres propriétés restent inchangés. C'est notamment le cas de l'énergie : le défaut de masse se retrouve sous la forme d'énergie cinétique des particules filles.

On ne peut pas prédire exactement quand un neutron donné va se désintégrer, car le processus est un phénomène quantique fondamentalement aléatoire. On peut seulement dire combien de temps les neutrons vivent en moyenne. Ainsi, pour mesurer la durée de vie moyenne du neutron, il faut observer la désintégration de nombreux neutrons.

À cette fin, les chercheurs ont fait appel à deux méthodes expérimentales : la technique de la « bouteille » et celle du « faisceau ». Dans

les expériences de bouteille, on confine les neutrons dans un récipient, et on compte combien il en reste au bout d'un temps donné. Dans la méthode du faisceau, on mesure non pas la disparition des neutrons eux-mêmes, mais l'apparition de particules en lesquelles ils se désintègrent.

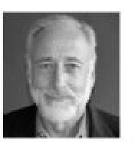
L'approche de la bouteille est particulièrement délicate parce que les neutrons traversent facilement la matière, donc les parois des récipients. Comme l'avait suggéré en 1959 le physicien soviétique Iakov Zeldovitch, les expérimentateurs qui utilisent l'approche de la bouteille (tels que Peter Geltenbort et ses collègues en France) contournent la difficulté en piégeant des neutrons extrêmement « froids » (c'est-à-dire dont l'énergie cinétique est très faible) dans un récipient aux parois faites d'un matériau approprié *(voir l'encadré pages 68-69)*. Si tous les neutrons sont suffisamment lents et si les parois sont de qualité suffisamment bonne, celles-ci réfléchissent les neutrons, qui restent donc dans la bouteille. Pour ce faire, les neutrons doivent se déplacer à des vitesses ne dépassant pas quelques mètres par seconde, très inférieures aux 10 millions de mètres par seconde environ des neutrons émis lors d'une fission nucléaire, par exemple. Ces neutrons « ultrafroids » sont si lents que vous pourriez les dépasser à la course. L'expérience de bouteille la plus précise en date a été effectuée à l'institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble.

Malheureusement, aucune bouteille n'est parfaite. Si des neutrons fuient occasionnellement hors du récipient, nous risquons d'attribuer cette perte aux désintégrations bêta et de commettre ainsi une erreur sur la durée de vie. Nous devons donc nous assurer d'effectuer les corrections nécessaires pour que nos calculs prennent en compte uniquement les particules qui ont effectivement subi une désintégration bêta.

Pour faire cette correction, nous avons recours à une astuce. Le nombre de neutrons s'échappant à travers les parois de la bouteille dépend de la fréquence à laquelle les neutrons rebondissent sur les parois. Si les neutrons sont plus lents ou si la bouteille est plus grosse, la fréquence des rebonds (et donc le taux de perte) diminue. En faisant varier à la fois la taille de la bouteille et l'énergie (la vitesse) des neutrons dans des tests successifs, nous pouvons extrapoler les résultats à une bouteille hypothétique où il n'y aurait pas de collisions, et donc pas de pertes au niveau des parois. Bien sûr, cette extrapolation n'est pas parfaite, mais nous faisons tout notre possible pour prendre en compte les éventuelles erreurs introduites par ce calcul.

Dans la méthode du faisceau, utilisée par Geoffrey Greene et d'autres au Centre de recherche sur les neutrons du NIST (*National Institute of Standards and Technology*, l'Institut américain des normes et de la technologie), on envoie un faisceau de neutrons froids à travers un piège électromagnétique constitué d'un champ magnétique et d'électrodes à haute tension en forme d'anneau. Ce dispositif piège les particules de charge positive *(voir l'encadré pages 68-69)*. Les neutrons étant électriquement neutres, ils le traversent sans encombre. Mais si un neutron se désintègre dans le piège, le proton (de charge positive) qui en résulte reste prisonnier. On ouvre périodiquement le piège, on en fait sortir

LES AUTEURS

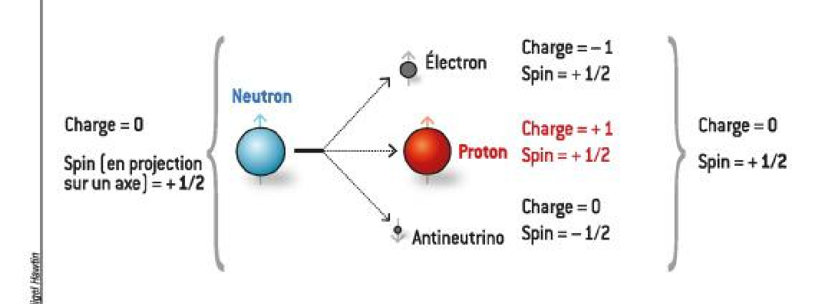



Geoffrey L. GREENE est professeur de physique à l'université du Tennessee, aux États-Unis, et travaille aussi à l'accélérateur SNS *(Spallation Neutron Source)* du Laboratoire américain d'Oak Ridge.

Peter GELTENBORT est chercheur membre de l'institut Laue-Langevin, à Grenoble.

COMMENT LES NEUTRONS SE DÉSINTÈGRENT

Le neutron libre (non lié au sein d'un noyau atomique) se désintègre spontanément au bout d'un temps qui, en moyenne, est égal à un peu plus de 14 minutes. Bien que cette durée de vie moyenne ne soit pas connue avec une assez bonne précision, on sait que le neutron se transforme par désintégration bêta, un processus dû à l'interaction faible, l'une des quatre interactions fondamentales. Le neutron se transforme alors en un proton, avec émission d'un électron et d'un antineutrino (l'antiparticule du neutrino). Dans ce processus, la charge électrique totale du système et la composante de son spin (moment cinétique intrinsèque) selon un axe quelconque restent inchangées.



Nigel Hawtin

les protons et on les compte. En principe, le piégeage et la détection des protons sont presque parfaits, et on n'a que quelques légères corrections à apporter pour prendre en compte les éventuelles désintégrations que l'on aurait manquées.

Pour être utile, le résultat d'une mesure doit être accompagné d'une estimation fiable de son exactitude. Une mesure de la taille d'une personne avec une incertitude de un décimètre, par exemple, est bien moins significative qu'une mesure dont l'incertitude est de un millimètre. C'est pourquoi on indique toujours l'incertitude expérimentale quand on fait des mesures de précision. Une incertitude de une seconde, par exemple, signifie que notre mesure a une forte probabilité de ne pas être plus d'une seconde plus courte ou plus longue que la valeur réelle.

Erreurs statistiques et erreurs systématiques

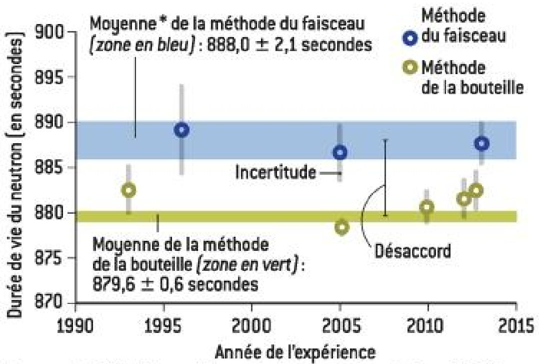
Toute mesure a, en général, deux sources d'incertitude. En premier lieu, des erreurs statistiques se produisent parce qu'une mesure expérimentale ne porte que sur un échantillon de taille finie – un nombre fini de désintégrations de neutrons dans notre cas. Plus l'échantillon est grand, plus la mesure est fiable et plus l'erreur statistique est faible.

La seconde source d'incertitude, l'« erreur systématique », est beaucoup plus difficile à estimer parce qu'elle découle d'imperfections dans le processus de mesure. Ces dernières peuvent être simples (comme une mauvaise calibration de la toise qui mesure la taille d'une personne). Elles peuvent aussi être plus subtiles, par exemple un biais d'échantillonnage : ainsi, dans un sondage téléphonique, le sondeur tend à composer des numéros sur ligne fixe plutôt que sur ligne mobile, ce qui risque de constituer un échantillon non représentatif de la population visée.

Les expérimentateurs se donnent beaucoup de mal pour réduire ces erreurs systématiques, mais elles sont impossibles à éliminer complètement. Le mieux que l'on puisse faire est de réaliser une étude détaillée de toutes les sources d'erreur imaginables, et ensuite estimer l'effet que chacune peut avoir sur le résultat final. On additionne ensuite cette erreur systématique avec l'erreur statistique afin de donner une meilleure estimation de la fiabilité globale de la mesure. En d'autres termes, on se donne beaucoup de mal afin d'estimer les « inconnues connues ».

TECHNIQUES DIFFÉRENTES, RÉSULTATS DIFFÉRENTS

Les chercheurs ont recouru à deux principales techniques pour mesurer la durée de vie moyenne des neutrons : la méthode de la « bouteille », et celle du « faisceau ». Les diverses mesures par la méthode de la bouteille sont en accord les unes avec les autres compte tenu de leurs marges d'erreur, comme le sont entre elles les mesures par la méthode du faisceau. L'ennui est que les résultats obtenus par les deux techniques divergent de plus de 8 secondes. L'écart peut sembler minime, mais il est d'amplitude bien plus grande que l'incertitude des mesures, ce qui signifie que cette divergence constitue un véritable problème. Soit les chercheurs ont sous-estimé les incertitudes de leurs résultats, soit, hypothèse plus passionnante, la différence résulte d'un phénomène physique inconnu.



* La moyenne de la méthode du faisceau ne tient pas compte de la mesure de 2005, supplantée par celle de 2013.

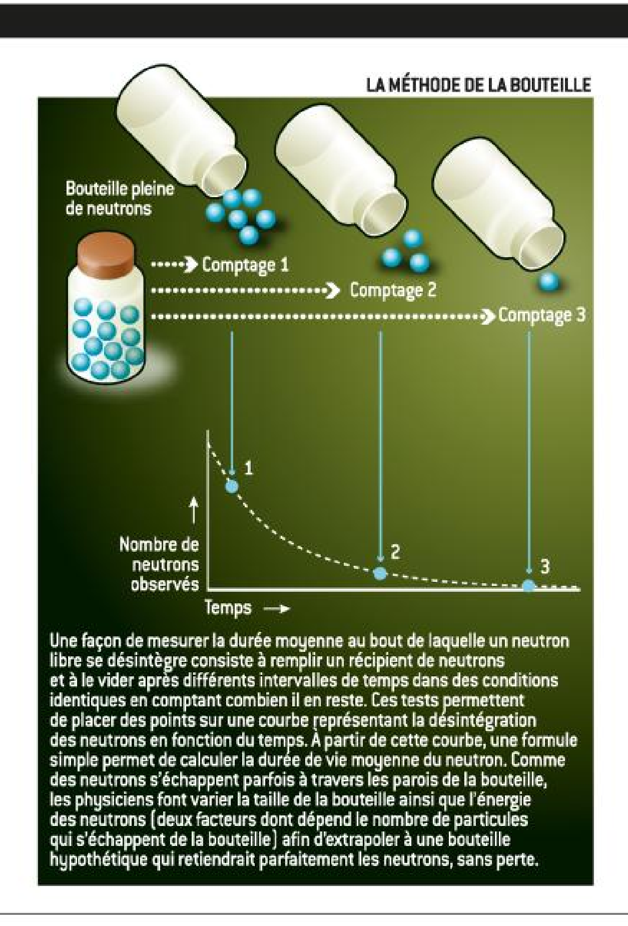
PLUSIEURS EXPÉRIENCES PORTANT SUR LA DURÉE DE VIE DU NEUTRON ont été réalisées au cours des vingt-cinq dernières années. La moyenne des résultats obtenus par une méthode diffère nettement de la moyenne des résultats donnés par l'autre méthode.

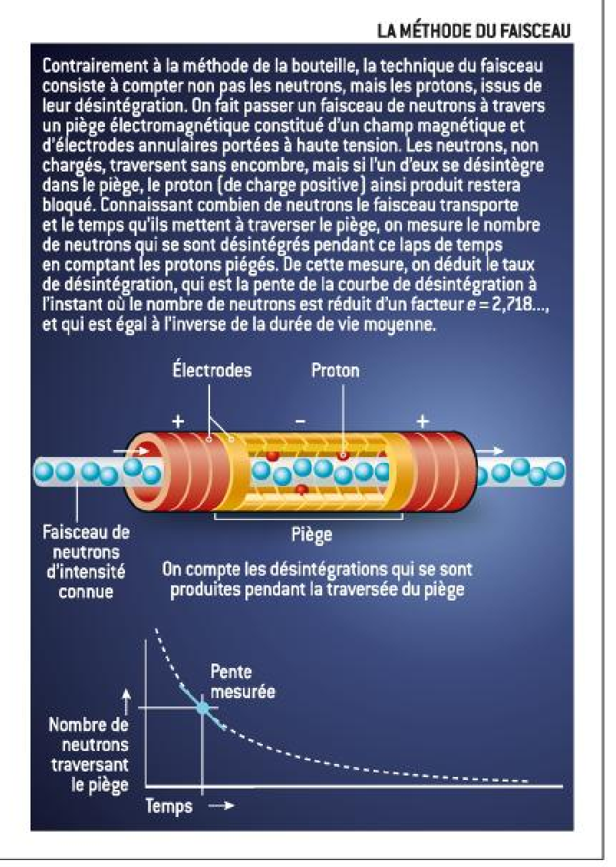
Bien sûr, la grande crainte est que l'on soit passé à côté d'une « inconnue inconnue » – un effet systématique, caché dans la procédure expérimentale, dont on ignore même l'existence. La seule façon de surmonter ce type d'erreur supplémentaire est d'effectuer une autre mesure complètement indépendante, par une méthode complètement différente qui ne partage pas les mêmes effets systématiques. Si ces deux mesures indépendantes sont en accord compte tenu de leurs incertitudes associées, on peut avoir confiance dans les résultats. Si, en revanche, elles sont en désaccord, c'est qu'il y a un problème.

Pour la durée moyenne de vie du neutron, nous disposons bien de deux mesures indépendantes, par le faisceau et par la bouteille. Le résultat le plus récent de l'expérience réalisée au NIST donne une valeur de 887,7 secondes pour la durée de vie du neutron. L'incertitude statistique est estimée à 1,2 seconde, et l'incertitude systématique à 1,9 seconde. Leur combinaison (qui n'est pas une simple addition) donne une incertitude totale de 2,2 secondes. Cela signifie que la valeur réelle de la durée de vie moyenne du neutron a une probabilité de 68 % de différer de moins de 2,2 secondes de la valeur mesurée.

L'expérience de la bouteille à l'ILL, en revanche, a livré une durée de vie moyenne égale à 878,5 secondes avec une incertitude statistique de 0,7 seconde, une incertitude systématique de 0,3 seconde et une incertitude totale de 0,8 seconde.

Il s'agit là des deux expériences les plus précises du monde pour les deux méthodes de mesure, et leurs résultats diffèrent de plus de 8 secondes. Cet écart peut paraître faible, mais il est nettement supérieur aux incertitudes évaluées pour chacune des deux expériences : la probabilité d'obtenir une telle différence par le seul fait du hasard est inférieure à 1/10000. Nous devons donc sérieusement envisager la possibilité que ce





désaccord résulte d'une inconnue inconnue, c'est-à-dire que nous soyons passés à côté de quelque chose d'important.

Des phénomènes nouveaux en jeu ?

Il serait passionnant que la divergence entre les deux mesures traduise un phénomène physique qui reste à découvrir. Une raison de le penser est que, bien que les méthodes de la bouteille et du faisceau soient en désaccord, les différentes études effectuées à l'aide d'une même méthode concordent.

Imaginons par exemple qu'en plus de la désintégration bêta classique, les neutrons puissent se désintégrer par un processus inconnu ne créant pas de protons, ces particules que l'on compte dans les mesures par la méthode du faisceau. Les expériences utilisant la méthode de la bouteille, où l'on compte le nombre total de neutrons « perdus », dénombreraient à la fois les neutrons qui ont disparu par désintégration bêta et ceux qui ont subi ce second processus. On obtiendrait une durée de vie plus brève que si le neutron était soumis à la seule désintégration bêta. Parallèlement, les expériences par la méthode du faisceau n'enregistreraient que les désintégrations bêta produisant des protons et fourniraient donc une valeur plus élevée de la durée de vie. Jusqu'à présent, comme nous l'avons vu, les expériences par faisceau mesurent effectivement une durée de vie légèrement plus longue que celles par bouteille.

Quelques théoriciens ont pris cette idée au sérieux. Zurab Berezhiani, de l'université de L'Aquila, en Italie, et ses collègues ont proposé que le neutron libre se transformerait parfois en un hypothétique « neutron miroir » qui n'interagirait plus avec la matière ordinaire et qui semblerait donc disparaître. Cette matière miroir pourrait contribuer à la quantité totale de matière noire de l'Univers.

Bien que cette idée soit séduisante, elle reste hautement spéculative. Avant que les physiciens n'acceptent un concept aussi radical que celui de matière miroir, il faudra une confirmation plus catégorique de la divergence entre les mesures de la durée de vie du neutron par les deux méthodes.

Il nous paraît beaucoup plus probable que l'une des expériences (voire les deux) ait sous-estimé l'un des effets systématiques ou omis d'en prendre en compte un. Une telle possibilité est toujours présente quand on travaille sur des dispositifs expérimentaux très fins et sensibles.

Certes, les expérimentateurs que nous sommes seront plus tranquilles quand nous aurons déterminé l'origine du désaccord entre les deux mesures. Mais surtout, si nous parvenons à mesurer avec précision la durée de vie moyenne du neutron, nous serons en mesure de régler plusieurs questions fondamentales sur l'Univers qui taraudent les physiciens.

Tout d'abord, une évaluation précise de l'échelle temporelle de la désintégration du neutron nous renseignera sur l'interaction faible en général. Cette force est responsable de la plupart des désintégrations radioactives et la désintégration bêta du neutron en est l'une des expressions les plus simples et les plus pures. Pour calculer les détails de processus nucléaires plus complexes faisant intervenir l'interaction faible, il nous faut d'abord comprendre comment elle opère dans la désintégration du neutron.

La durée de vie du neutron est l'un des paramètres qui déterminent l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang

Pourquoi la durée de vie du neutron importe

Déterminer avec précision le rythme de désintégration des neutrons nous aiderait également à tester la description des débuts de l'Univers qu'en donne la théorie du Big Bang.

Selon cette dernière, quand l'Univers n'était âgé que d'environ une seconde, il était constitué d'un mélange chaud et dense de particules : protons, neutrons, électrons et quelques autres... À cette époque, la température de l'Univers s'élevait à environ 10 milliards de degrés, une température telle que ces particules étaient trop énergétiques pour qu'elles puissent se lier et former des noyaux ou des atomes. Au bout de trois minutes environ, l'Univers s'est dilaté et refroidi, atteignant une température à laquelle les protons et les neutrons ont pu se lier et former les noyaux atomiques les plus simples : du deutérium, l'isotope lourd de l'hydrogène.

À partir de là, d'autres noyaux simples ont pu se former. Ainsi, en capturant un proton, le deutérium produit un isotope de l'hélium (^{3}He) ; en se liant, deux noyaux de deutérium donnent naissance à un isotope plus lourd de l'hélium (^{4}He) ; et des noyaux plus lourds se sont formés en petit nombre, jusqu'à l'élément lithium (quant aux éléments plus lourds, on pense qu'ils ont été produits dans les étoiles, un grand nombre de millions d'années plus tard).

Ce processus est connu sous le nom de nucléosynthèse primordiale. Si, pendant que l'Univers se refroidissait, les neutrons s'étaient désintégrés trop vite, il ne serait plus resté aucun neutron quand la température a diminué suffisamment pour que se forment des noyaux atomiques : il ne serait resté que des protons, et nous aurions un cosmos presque entièrement constitué d'hydrogène.

En revanche, si la durée de vie du neutron avait été trop longue par rapport au temps nécessaire pour que l'Univers se refroidisse et que la nucléosynthèse primordiale soit possible, l'hélium aurait été surabondant, ce qui aurait perturbé la formation des éléments plus lourds intervenant dans l'évolution des étoiles et, à terme, dans l'apparition de la vie. Ainsi, l'équilibre entre la vitesse de refroidissement de l'Univers et la durée de vie du neutron était critique pour que se créent les éléments dont sont composés notre planète et tout ce qui y vit.

À partir des données astronomiques, on peut mesurer le rapport entre les abondances cosmiques d'hélium et d'hydrogène, ainsi que les abondances de deutérium et d'autres éléments lourds. Nous aimerions savoir si ces mesures sont en accord avec les valeurs prédites par la théorie du Big Bang. Mais la prédiction théorique dépend de la valeur précise de la durée moyenne de vie du neutron. En l'absence d'une valeur précise et exacte, notre capacité à effectuer des comparaisons est limitée.

Quand la durée de vie du neutron sera connue plus précisément, nous pourrons comparer le taux de désintégration observé à partir des données astrophysiques avec la valeur prédite à partir de la théorie. Si elles sont en accord, nous pourrons avoir davantage confiance dans notre scénario standard du Big Bang expliquant la manière dont l'Univers a évolué. Évidemment, si elles sont en désaccord, il faudra sans doute réviser ce modèle. Par exemple, certains désaccords pourraient indiquer l'existence de nouvelles particules, non prévues, qui auraient interféré avec le processus de nucléosynthèse.

Comment résoudre le problème du désaccord des mesures actuelles de la durée de vie du neutron ? L'approche naturelle consiste à effectuer des expériences complémentaires par des méthodes de précision comparable et qui ne soient pas sujettes aux mêmes erreurs systématiques. Outre la poursuite des mesures par la méthode de la bouteille et par celle du faisceau, plusieurs équipes dans le monde cherchent des méthodes alternatives.

Un groupe du J-PARC (*Japan Proton Accelerator Research Complex*, « Complexe japonais de recherche par accélérateurs de protons »), à Tokai, développe ainsi une expérience sur faisceau qui détectera les électrons, plutôt que les protons, produits lors de la désintégration des neutrons.

Par ailleurs, des équipes de l'ILL, de l'Institut de physique nucléaire de Saint-Pétersbourg, en Russie, du Laboratoire américain de Los Alamos, de l'université technique de Munich et de l'université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, projettent d'utiliser des bouteilles où les neutrons ultrafroids seront confinés au moyen de champs magnétiques plutôt que par des parois matérielles (le neutron, bien qu'électriquement neutre, se comporte comme un petit aimant et est donc sensible à un champ magnétique). Le nombre de neutrons accidentellement perdus à travers les parois de ce type de bouteilles devrait être assez différent de celui des expériences précédentes, et les erreurs systématiques associées devraient donc différer aussi.

Espérons que les mesures en cours et la prochaine génération d'expériences résoudront enfin cette énigme, d'ici à quelques années au plus. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Tyler, **The lives and times of neutrons**, *1663* [magazine du Laboratoire américain de Los Alamos], pp. 6-11, juillet 2016 (PDF sur http://bit.ly/2axNSnS).

A. T. Yue *et al.*, **Improved determination of the neutron lifetime**, *Physical Review Letters*, vol. 111(22), article 222501, 2013.

F. E. Wietfeldt et G. L. Greene, **The neutron lifetime**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 83(4), article 1173, 2011.

A. Serebrov *et al.*, **Measurement of the neutron lifetime using a gravitational trap and a low-temperature Fomblin coating**, *Physics Letters B*, vol. 605(1-2), pp. 72-78, 2005.

Einstein et la presse
une relation tumultueuse

À partir de 1919, Einstein, devenu célèbre, intéresse au plus haut point les médias, notamment le *New York Times*. Le physicien découvre alors leur pouvoir et leurs dangers...

Jean-Marc Ginoux et Christian Gérini



UNE NUÉE DE JOURNALISTES attendait Albert et Elsa Einstein à New York fin 1930, lors d'un séjour aux États-Unis : « Les journalistes ont posé des questions extraordinairement stupides, auxquelles je répondis avec des blagues bon marché qui ont été reçues avec enthousiasme », note le physicien dans son journal de voyage.

Le 2 décembre 1919, Albert Einstein accorda l'une de ses premières interviews au *New York Times*. Près d'un mois plus tôt, le 6 novembre, l'astronome britannique Frank Dyson avait présenté les résultats de deux expéditions menées pour mesurer la déflexion de la lumière d'une étoile par le Soleil lors de l'éclipse du 29 mai 1919, et ceux-ci avaient confirmé l'une des trois prédictions de la théorie de la relativité générale, énoncée en 1915. Immédiatement, la presse avait diffusé l'information et Einstein avait acquis, du jour au lendemain, une célébrité sans précédent.

« La théorie d'Einstein triomphe », avait titré le *New York Times* dès le 10 novembre. Tout en restant elliptique sur l'étendue de la victoire en question car, précisait le journaliste, seule une douzaine de savants dans le monde était capable de comprendre de quoi il retournait, de l'aveu même du physicien allemand. Changement de discours, trois semaines plus tard, dans l'interview du 2 décembre car Einstein s'y montra bien plus didactique en livrant l'élément déclencheur de sa découverte : un tragique accident auquel il avait assisté. « Einstein expose sa nouvelle théorie. Elle rejette le temps et l'espace absolus, ne les reconnaît que comme relatifs aux systèmes en mouvement. [...] Einstein a été inspiré comme Newton, mais par un homme tombant d'un toit plutôt que par une pomme tombant d'un arbre », rapporta le *New York Times*.

« C'est de [sa bibliothèque mansardée] qu'il a observé, il y a des années, la chute d'un homme depuis un toit voisin [...] », expliquait l'article. « Cet homme, raconte le Dr Einstein, pendant sa chute, n'a pas fait l'expérience de ce que l'on considère normalement comme l'effet de la gravité, effet qui, selon la théorie de Newton, l'aurait violemment attiré vers le sol. » L'anecdote était percutante et accentuait le contraste saisissant entre l'extraordinaire complexité d'une théorie réservée à une douzaine d'initiés et la banalité d'une observation qu'un simple profane aurait pu faire (sans pour autant en tirer une telle interprétation).

Ce coup de maître signa le début d'une relation ambiguë, complexe et tumultueuse avec le *New York Times*. Car la communication médiatique ne se résumait déjà pas à trouver de jolies images et Einstein le découvrit à ses dépens, comme le montre l'étude des milliers d'articles que le quotidien lui consacra, tant pour ses découvertes scientifiques que pour ses engagements publics ou politiques.

L'ESSENTIEL

- **En 1919, des mesures lors d'une éclipse de Soleil confirment la théorie de la relativité générale, énoncée par Einstein en 1915.**
- **Dès lors, le savant devient un sujet de prédilection du *New York Times*.**
- **Travaux scientifiques, engagements publics ou politiques, anecdotes, vie privée, tout est bon pour nourrir le quotidien.**
- **Entre maladresses et effets d'annonce, Einstein découvre, au fil des ans, le pouvoir de la presse.**

LES AUTEURS





Jean-Marc GINOUX est maître de conférences en mathématiques et en histoire des sciences à l'université de Toulon.

Christian GÉRINI est maître de conférences en philosophie et histoire des sciences et des techniques dans la même université (laboratoire I3M) et membre du GHDSO, à Orsay.

Les premières difficultés apparurent durant l'été 1921. Du 2 avril au 30 mai, Einstein avait accepté d'accompagner Chaim Weizmann, président de l'Organisation mondiale sioniste, dans sa tournée aux États-Unis pour collecter des fonds destinés à la création d'une université hébraïque à Jérusalem. De retour à Berlin, le 1er juillet, Einstein donna une conférence à la Croix-Rouge allemande sur son voyage américain. Imaginez sa surprise de voir le lendemain le *New York Times* titrer : « Le Dr Einstein trouve l'Amérique antiallemande » ! Avec un article assurant que : « Le Dr Albert Einstein a déclaré qu'il avait trouvé l'Amérique violemment antiallemande [...] et l'Angleterre ardemment proallemande. »

En réalité, ces propos travestissaient le discours d'Einstein, rapporté un peu plus loin dans l'article *(voir l'image page 75)*. Einstein découvrait comment une déclaration un peu rapide d'un homme célèbre pouvait se transformer en faisant les gros titres des journaux.

Einstein et les *desperate house-husbands*

Et cela ne faisait que commencer : la même semaine, le 7 juillet 1921, Cyril Brown, correspondant du *New York Times* à Berlin, demanda à Einstein ce qu'il pensait de la vie en Amérique. Sa réponse fut publiée sous la titraille : « Selon Einstein, les femmes dominent ici. Le scientifique trouve que les hommes américains sont les toutous de ces dames. Les gens s'ennuient tellement. Einstein pense qu'ils s'enthousiasment à outrance de sa venue pour combler d'autres manques. » Et de citer le physicien :

Les hommes ne s'intéressent absolument à rien. Ils travaillent encore et encore [...]. Du reste, ils sont les toutous des femmes, qui dépensent l'argent sans compter et s'entourent d'un voile d'extravagance. Elles font tout ce qui est en vogue, et ont comme par hasard succombé à la mode Einstein.

Cet article suscita de très vives réactions aux États-Unis, si bien que, dès le lendemain, le *New York Times* rebondissait sur le sujet avec un article intitulé : « Les femmes de Chicago n'apprécient pas les opinions d'Einstein. » Ces incidents, dus au manque d'expérience d'Einstein face à la presse, eurent un effet désastreux et

durable sur son image dans une partie de l'opinion publique américaine, qui ne manqua pas une occasion de lui rappeler les *« toy dogs of women »*, notamment lorsque le chercheur fit une demande de visa en 1932.

Après cette déconvenue, Einstein se montra longtemps plus circonspect face aux demandes d'interviews. Les journalistes, avides d'informations sur le physicien, durent le plus souvent se contenter d'anecdotes glanées auprès de gens qui l'avaient croisé, tel ce conducteur de tramway berlinois qui affirma en 1924 qu'Einstein était mauvais en arithmétique, ce dernier lui ayant soutenu que la monnaie rendue était incorrecte. Les articles se concentrèrent donc principalement sur les nouvelles officielles – l'annonce d'un film expliquant la relativité, les conférences d'Einstein au Collège de France à Paris en 1922, l'entrée du savant dans le comité d'intellectuels de la Société des Nations, l'annonce de son prix Nobel, en novembre 1922, pour sa « découverte des lois de l'effet photoélectrique ».

Pourtant, en 1930, peut-être encouragé par les longs articles encenseurs parus à l'occasion des 25 ans de la publication de la théorie de la relativité restreinte, Einstein mit de côté ses résolutions et, à la demande du *New York Times*, accepta de livrer son opinion sur la religion et la science. L'article, publié le 9 novembre 1930, déclencha un tollé dans l'opinion publique américaine très puritaine. Einstein y recense « les sentiments et les besoins qui ont amené l'humanité à la pensée religieuse et à la foi » : d'abord la peur, ensuite les « sentiments sociaux », c'est-à-dire « le désir de conseils, d'amour et de secours [qui] favorisent la croissance d'une conception sociale ou morale de Dieu ». Selon lui, ces besoins ont conduit aux diverses religions que nous connaissons. Mais il en existe un autre, chez quelques « individus exceptionnellement doués ou des communautés particulièrement nobles » :

Chez ces derniers se trouve un troisième niveau de l'expérience religieuse, bien qu'il ne se manifeste que rarement sous sa forme pure. J'appellerai cela le sentiment religieux cosmique. [...] *L'individu ressent la vanité des désirs et des objectifs humains, et la noblesse et l'ordre merveilleux que révèlent la nature et le monde de la pensée. Il ressent la destinée individuelle comme une prison et cherche à connaître une existence totale, une unité pleine de sens.* [...] *Ce sentiment religieux cosmique* [...] *ne reconnaît ni dogme, ni Dieu à l'image de l'homme.* [...] *Il me semble que la plus importante fonction de l'art et de la science est de faire naître et de nourrir ce sentiment chez ceux qui lui sont réceptifs.* [...] *Le sentiment religieux cosmique est la plus considérable et noble force motrice de la recherche scientifique.*

Cet article donna lieu à de vives réactions émanant de presque toutes les communautés religieuses et à de nombreux courriers au journal. Dans l'un d'eux, le révérend Fulton Sheen conseilla à Einstein de retirer la lettre « s » de « cosmique », considérant que sa vision de la religion n'était que « pure stupidité et balivernes ».

On aurait pu croire qu'avec le temps, Einstein serait devenu plus prudent et réservé en livrant ses opinions. Mais jusqu'à la fin de sa vie, il continua à dire au journal ce qu'il pensait, quitte à y être catalogué d'ex-pacifiste, lorsqu'il affirma le 29 décembre 1941, trois semaines après l'attaque surprise de Pearl Harbour, que les démocraties l'emporteraient sur les puissances totalitaires, mais qu'il faudrait frapper fort pour y parvenir. Pourquoi Einstein a-t-il tant communiqué, parfois au mépris des contingences sociales, religieuses ou politiques ? Ne savait-il pas résister au virus médiatique ? Ou y trouvait-il aussi son intérêt ? Car entre-temps le physicien, loin d'être un simple « people » manipulé par les journalistes, avait appris à utiliser la presse pour servir son besoin de communication scientifique.

Je désapprouve les annonces de prépublications dans la presse généraliste

A. Einstein, *New York Times*, 7 mai 1935

Effets d'annonce

Il avait commencé le 22 mars 1923, en recevant un correspondant du *New York Times* à Berlin afin de lui faire part des résultats de ses dernières recherches. Il y annonçait « une nouvelle découverte qui fera selon lui encore plus sensation que sa théorie de la relativité ». Rien de moins.

Cinq jours plus tard, en apparence pas rancunier, Einstein confiait à Cyril Brown lui-même (l'auteur de l'article sur les « toutous des femmes ») les détails de sa nouvelle théorie, dite du champ unifié :

Je peux vous dire de quoi elle parle en une phrase [...]. *Elle concerne la relation entre l'électricité et la gravitation* [...]. *C'est une théorie purement mathématique qui ne peut donc pas être expliquée au profane.*

Une adroite façon pour le physicien de détourner la puissance du quotidien pour faire des effets d'annonce en n'hésitant pas à jouer sur le registre du mystère (trop compliquée pour être comprise) et celui de la surenchère (plus fort que la relativité générale), alors même que ce champ de recherche allait se révéler une impasse ! Einstein consacra en effet le reste de son existence à tenter de développer sa théorie du champ unifié. Mais en vain. Jusqu'en 1933, il informa régulièrement les journaux de ses derniers avancements. Puis, devant ses tentatives infructueuses, il cessa de communiquer ses résultats. Et lorsqu'en 1949, le *New York Times* publia un article intitulé : « La nouvelle théorie d'Einstein est la clé maîtresse de l'Univers », Einstein refusa de recevoir les journalistes et demanda à sa secrétaire Helen Dukas de leur transmettre ce message : « Revenez me voir dans vingt ans. »

Autre effet d'annonce contrôlé par Einstein : son changement radical de vision du cosmos en 1931, dont il réserva la primeur à la presse. Le *New York Times* présenta même,

jour après jour, les différents épisodes de cette volte-face. La série commence début janvier 1931, lorsque Einstein se rendit à l'institut de technologie de Californie (Caltech) dans le but de tester son hypothèse cosmologique, fondée sur sa théorie de la relativité générale et dont le postulat était que l'Univers est homogène, courbe et statique. Les observations des astronomes américains Edwin Hubble et Milton Humason au mont Wilson, deux ans auparavant, avaient en effet mis en cause l'Univers statique. Les deux physiciens avaient observé que la lumière provenant des nébuleuses distantes subit un décalage vers le rouge proportionnel à leur distance par rapport à la Terre, ce qui avait conduit à la loi de Hubble, énoncée ainsi dans le *New York Times* du 31 décembre 1930 : « Les nébuleuses sont toutes en train de s'éloigner de nous, et plus elles sont loin, plus elles s'éloignent rapidement. » Dès le 3 janvier, première annonce d'Einstein dans une interview au *New York Times* : « Les nouvelles observations faites par Hubble et Humason [...] laissent supposer que la structure générale de l'Univers n'est pas statique. »

Et le 6 février, le physicien Leigh Page confiait au quotidien que « les travaux effectués sur la côte Ouest et les observations du mont Wilson ont convaincu le Dr Einstein que le concept d'un univers statique n'est pas défendable ». Deux jours plus tard, le journal annonçait que la vision cosmologique d'Einstein avait complètement changé : « Après avoir visité l'observatoire et après qu'un vétéran de 42 ans de l'American Expeditionnary Forces [Hubble] lui a montré des photographies d'objets se trouvant à une distance de la Terre encore plus incompréhensibles que ses formules mathématiques, le professeur Einstein a annoncé mercredi dernier qu'il avait abandonné son concept initial de l'Univers. »

Faisant fi des traditions académiques, ce n'est que le 11 février qu'Einstein exposa son revirement devant un groupe d'astronomes et de physiciens et discuta avec eux des conséquences du décalage vers le rouge des nébuleuses lointaines sur la conception de l'Univers. Puis, le 26 juin, après son retour à Berlin, il présenta sa nouvelle conception cosmologique lors d'une conférence universitaire : un univers dynamique en expansion, qui se contractera au-delà d'une certaine limite.

DR. EINSTEIN FOUND AMERICA ANTI-GERMAN

Violently So, He Says, Though He Noted That a Reaction Was Setting In.

Copyright, 1921, by The New York Times Company.
Special Cable to THE NEW YORK TIMES.

BERLIN, July 1.—Dr. Albert Einstein says he found America violently anti-German, although with evidences of a change of heart taking place, and England eagerly pro-German. These discoveries in relativity he imparted today to a select party at the home of Herr von Winterfeldt, President of the German Red Cross, whose guest of honor Dr. Einstein has been since his return from America and England.

Dr. Einstein told the guests, among whom were President Ebert and the members of his Cabinet, the members of the Prussian Government, the Chief Burgomaster of Berlin and leaders in the business and industrial world.

"In America there undeniably predominated a markedly unfriendly feeling toward everything German. American public opinion was so excited that even the use of the German language was suppressed. At present a noticeable change is taking place. I was received heartily by America's learned men and learned corporations. They gladly spoke German, and everywhere were mindful with genuine sympathy of the German scientists and institutes with which they maintained so close a friendship before the war.

"In England the impression forced itself upon me that English statesmen and scholars had it in mind again to bring about friendly relations with Germany. The heartiness of the speeches in England could hardly be surpassed. Better times appear to be coming."

The New York Times

« EINSTEIN trouve l'Amérique antiallemande », lit-on dans le *New York Times* du 2 juillet 1921. Dans la suite de l'article, le physicien précise qu'« à l'heure actuelle, un changement notable est en cours » et qu'il fut « reçu chaleureusement par les savants Américains », mais il mit quand même l'Amérique en émoi.

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Ginoux, **Albert Einstein : une biographie à travers le temps,** Hermann, 2016.

S. Bergia, **Einstein, le père du temps moderne,** Belin, 2004.

J. Eisenstaedt, **Einstein et la relativité générale,** CNRS Éditions, 2002.

A. Pais, **Subtle is the Lord, The Science and the Life of Albert Einstein,** Oxford University Press, 1982 (rééd. 2005).

R. W. Clark, **Einstein, the Life and Times,** Hodder and Stoughton, 1973.

Pourquoi Einstein exposa-t-il sa démarche scientifique à la presse ? Est-ce pour rechercher un quelconque retentissement médiatique ou simplement dans une volonté de transparence sur ce qu'il considérait comme une vérité scientifique ? Difficile de répondre, mais une chose est sûre : Einstein voulait être le maître du jeu, comme le montre sa réaction outragée à la fuite orchestrée de la publication du paradoxe EPR, trois ans plus tard.

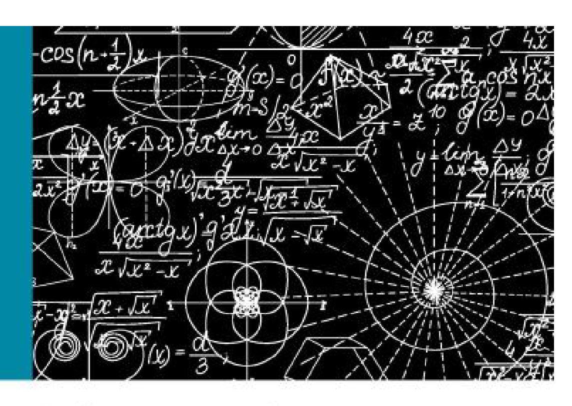
Podolsky n'aurait pas dû

Bien qu'il ait été à l'origine du développement de la mécanique quantique au début du XXe siècle, Einstein chercha tout au long de sa vie à prouver, au moyen de ses célèbres expériences de pensée, l'incomplétude de cette théorie, refusant son caractère probabiliste qui impliquait de renoncer au déterminisme sur lequel toute la physique avait été construite jusqu'alors. Aussi, avec deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen, il publia le 15 mai 1935, dans une revue spécialisée, un article intitulé *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?* (La description de la réalité physique grâce à la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?) qui fit couler beaucoup d'encre sous le nom de paradoxe EPR. Mais deux semaines avant la publication officielle de cet article, Podolsky révéla son contenu au *New York Times*, qui le présenta ainsi : « Einstein attaque la théorie des quanta. »

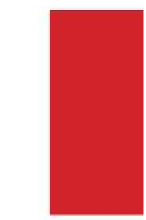
Einstein, pris de court, fut très contrarié par l'attitude de Podolsky et adressa aussitôt une lettre de désapprobation au *New York Times*, que le quotidien rapporta en ces mots : « Einstein fait une déclaration. Il affirme ne pas avoir autorisé le rapport sur la théorie des quanta. » Dans sa déclaration, le physicien, qui ne manquait pas de culot en l'occurrence, précisait qu'il avait l'habitude de ne discuter de sujets scientifiques que dans les lieux appropriés et qu'il désapprouvait les annonces de prépublications dans la presse généraliste !

Cet épisode houleux des rapports entre le *New York Times* et le père de la relativité ne mit pas un point final à leur relation, comme on l'a vu. Car le quotidien, qui contribua grandement à faire d'Einstein une légende, sut toujours user et abuser de la figure emblématique ainsi créée pour entretenir, année après année, l'intérêt de ses lecteurs. ■

INDISPENSABLES MATHÉMATIQUES



Quinze pour cent du PIB et neuf pour cent des emplois sont impactés directement par les mathématiques. C'est dire l'importance de cette discipline pour l'économie française comme l'a mesuré pour la première fois l'Étude sur l'Impact Socio-Économique des Mathématiques en France (EISEM), publiée au printemps 2015. De fait, rendues incontournables par l'avènement de l'ère numérique, les mathématiques irriguent tous les secteurs de l'économie, se nichent au cœur de révolutions telles que l'intelligence artificielle, interviennent dans la compréhension de problèmes majeurs de notre époque, comme ceux liés au développement durable, au climat, à la santé. Et transforment désormais notre quotidien… Aujourd'hui, il n'y pas de véritable innovation sans mathématiques en arrière-plan. Un enjeu de développement dont doivent s'emparer étudiants, entrepreneurs et décideurs.



Un colloque pour débattre des mathématiques et du monde de demain

MATHÉMATIQUES, oxygène du numérique

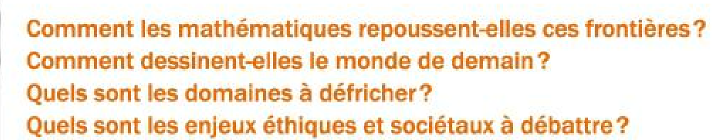
20 et 21 octobre 2016
campus de l'UPMC SORBONNE UNIVERSITÉS (Jussieu), Paris 5e



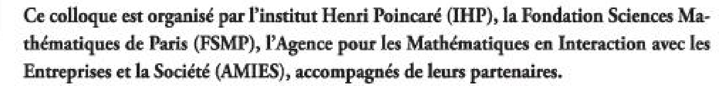
Programme : www.mathoxynum.fr

: mathoxynum

La science s'écrit en langage mathématique : informatique, physique, biologie, économie, sciences sociales… les applications se multiplient, les frontières s'estompent, l'interdisciplinarité prospère. Les mathématiques s'invitent partout, rendues d'autant plus incontournables avec l'avènement de l'ère numérique et le fameux « Big Data ». Quant aux mathématiciens, ils sont sollicités dans des domaines de plus en plus variés et voient leurs carrières évoluer entre le monde académique et le secteur privé.



Comment les mathématiques repoussent-elles ces frontières ?
Comment dessinent-elles le monde de demain ?
Quels sont les domaines à défricher ?
Quels sont les enjeux éthiques et sociétaux à débattre ?



Ce colloque est organisé par l'institut Henri Poincaré (IHP), la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (FSMP), l'Agence pour les Mathématiques en Interaction avec les Entreprises et la Société (AMIES), accompagnés de leurs partenaires.







Des événements à retenir

- Les Rendez-Vous Carnot 2016, les 5 et 6 octobre, au Double Mixte à Villeurbanne : tous les laboratoires adhérant à la charte Carnot, qui facilite les relations entre laboratoires de recherche publique et entreprises, y seront, dont l'Agence Maths-Entreprises AMIES.

- Le PhD Talent Fair, le 21 octobre 2016, au Centquatre, Paris 19e ; « The PhD Market place for all disciplines ». AMIES y sera.

- Le Forum Emploi-Maths 2016, l'événement référent pour les relations Entreprises-Mathématiciens, le 15 décembre 2016 à la Cité des Sciences de La Villette. Les entreprises y recrutent, les étudiants et PhD en maths y pullulent.



Des Laboratoires d'Excellence

Les mathématiques disposent sur l'ensemble du territoire d'un important réseau de structures les reliant aux entreprises et à la société. Leurs actions sont nationales et internationales. Parmi celles-ci, les LabEx préfigurent les nouvelles passerelles entre recherche, formation et monde économique, telles que voulues par les Investissements d'Avenir. Deux exemples pour mieux comprendre l'importance de ces laboratoires.

Le LabEx CEMPI

Englobant recherche, formation et transfert technologique, le LabEx CEMPI – Centre Européen pour les Mathématiques, la Physique et leurs Interactions – est porté par deux laboratoires de l'université de Lille 1 : le PhLAM (Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules) et le laboratoire Paul Painlevé. Fort de 120 chercheurs et enseignants-chercheurs, il réunit un large spectre de compétences en mathématiques pures et appliquées, physique théorique et expérimentale ainsi qu'en transfert technologique dans les fibres optiques. Il travaille en étroite collaboration avec l'Equipex FLUX, qui exploite la centrale de fabrication de fibre optique la plus complète de France.

CEMPI

Archimède



Le haut débit en lumière

La recherche au CEMPI est centrée sur des thématiques à l'intersection entre les mathématiques, la physique, la biologie et l'informatique. À titre d'exemple, nos chercheurs étudient la propagation de la lumière dans les fibres optiques et font varier le diamètre de la fibre pour engendrer des effets physiques nouveaux et inventer de nouvelles manières de transmettre de l'information dans une fibre.

Dans le domaine des sciences du vivant, les chercheurs du CEMPI collaborent avec l'institut Pasteur de Lille afin de mieux comprendre et contrôler les dysfonctionnements induits par les problèmes de coordination entre l'horloge biologique et le métabolisme.

Le CEMPI se distingue également en recherche fondamentale : en témoignent ses succès dans la théorie des nombres et la géométrie, ses distinctions ERC, sa médaille de bronze du CNRS et son prix Leconte de l'Académie des sciences. Et, en ce qui concerne la formation, le CEMPI accueille et finance également des étudiants stagiaires en master, des doctorants et post-doctorants.

Des vocations industrielles et internationales

Le CEMPI a noué de nombreuses collaborations industrielles, à l'instar du laboratoire commun avec Draka (Prysmian), le premier fabricant mondial de câbles optiques et d'un laboratoire de recherche conventionnée avec le CEA CESTA. Il met également l'accent sur les collaborations de recherche et de formation avec des centres de recherche et des universités de premier plan à l'étranger.

Le LabEx Archimède

Archimède fait partie depuis 2012 de l'IDEX *A*MIDEX* d'Aix-Marseille Université. Il dynamise les activités de recherche, de formation à la recherche et de valorisation en mathématiques et en informatique. Il s'appuie sur 4 laboratoires d'environ 300 chercheurs permanents et sur le CIRM (Centre International de Rencontres Mathématiques). Outil majeur de la communauté française qui n'a que deux équivalents dans le monde, ce dernier accueille une rencontre internationale par semaine.

L'interdisciplinarité maths-info

Le LabEx Archimède finance des conférences, écoles et programmes de recherche en résidence permettant d'inviter des chercheurs internationaux sur des périodes de plusieurs mois. Il offre des bourses (master 2, doctorat et post-doctorat) attirant des étudiants de tous les continents sur le critère de l'excellence académique. Il favorise l'interdisciplinarité grâce à des bourses à l'interface entre l'informatique et les mathématiques. Il représente un excellent levier et nombre d'étudiants d'Archimède ont obtenu des emplois permanents dans le monde entier.

Une valorisation industrielle et grand public

Le LabEx Archimède développe un programme innovant de valorisation, transmission des compétences et transfert de technologie. Il offre des formations professionnelles pour des chercheurs d'autres domaines ou du monde extra-académique. Il est le point d'entrée privilégié de la SATT Sud-Est. Archimède a organisé avec AMIES deux Semaines d'Études entre étudiants et industriels, certains sujets ayant débouché sur un projet R&D et une mission doctorale d'expertise. Archimède soutient activement l'organisation par des étudiants et jeunes chercheurs de manifestations pour la diffusion des connaissances vers le grand public, comme les Treize Minutes de Marseille, les Journées Pi de l'association marseillaise ∏-day, récompensée en 2016 par le prix D'Alembert de la SMF, ou encore en 2017 le congrès Math.en.Jeans de l'association marseillaise Maths pour Tous, lauréate du prix D'Alembert en 2014.

Ainsi, le LabEx Archimède est reconnu pour ses compétences et initiatives. Les mathématiques marseillaises sont régulièrement fort bien positionnées dans les classements internationaux et de nombreux chercheurs d'Archimède ont été récompensés par des bourses européennes ou des distinctions et prix internationaux.















LOGIQUE & CALCUL

Des indécidables à portée de main

Les énoncés dont on ne peut prouver ni qu'ils sont vrais ni qu'ils sont faux semblent moins rares qu'on ne l'imaginait : de tels « indécidables », redoutés par les mathématiciens, ont été trouvés avec des problèmes portant sur de petites machines de Turing.

Jean-Paul DELAHAYE

Si un problème mathématique paraît assez simple, comme « Est-ce que, pour tout entier positif n, $4n^4+1$ est un nombre premier ? », le mathématicien ne doute pas qu'il saura le résoudre. Bien sûr, d'un mathématicien à l'autre, cette perception de ce qui est facile et de ce qui ne l'est pas change, et plus un mathématicien est compétent, plus nombreux sont les problèmes qu'il est capable de classer en « facile » ou « probablement difficile ».

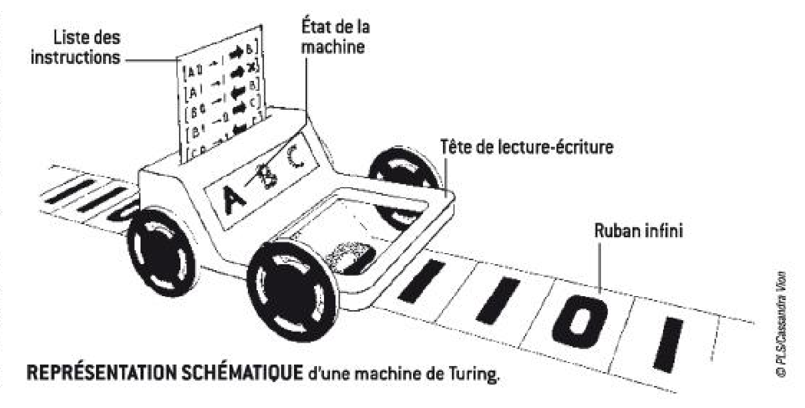
Il se trouve cependant que même les meilleurs des mathématiciens sont impuissants à évaluer la difficulté de questions à l'apparence élémentaire. Fermat n'avait certainement pas imaginé combien il était difficile de démontrer qu'il n'y a pas de solution à l'équation $n^q+m^q=p^q$, où n, m, p désignent des entiers positifs et q un entier supérieur à 2. De graves obstacles sont dissimulés dans des énoncés d'allure innocente. Les problèmes les plus difficiles sont ceux qualifiés d'« indécidables ». Un jeu utile et délicat est de repérer les indécidables les plus simples dans le but de mieux comprendre où cette apparition d'obstacles graves risque de se produire. Identifier où se niche leur absolue difficulté fait progresser les mathématiques aussi bien que la résolution de problèmes.

Qu'est-ce que l'indécidabilité ? Un énoncé est indécidable dans une théorie donnée si celle-ci ne peut ni démontrer l'énoncé, ni démontrer sa négation. Bien sûr, pour établir que des énoncés sont indécidables dans une théorie mathématique donnée T, il faut avoir très précisément défini cette théorie. Il faut aussi avoir acquis une maîtrise de ce qui s'y passe et, en particulier, il faut pouvoir prouver des théorèmes à propos des démonstrations !

C'est la tâche de la logique mathématique, parfois nommée métamathématique, puisqu'elle fournit une compréhension mathématique des mathématiques. Son développement aux XIXe et XXe siècles nous a permis de comprendre et de mesurer avec finesse le pouvoir déductif des théories.

Démontrer l'axiome des parallèles (par un point extérieur à une droite donnée D, il ne passe qu'une droite D' ne rencontrant pas D) ou sa négation à partir des autres axiomes de la géométrie du plan n'est pas possible. L'axiome des parallèles est un indécidable de la géométrie « de base », aussi dénommée géométrie absolue, ou géométrie neutre. De même, démontrer l'« axiome du choix » et l'« hypothèse du continu » ou leur négation à partir des axiomes habituels de la théorie des ensembles est impossible. C'est un résultat obtenu en deux temps par l'Autrichien Kurt Gödel en 1938 et l'Américain Paul Cohen en 1963.

Mieux et beaucoup plus général : selon le premier théorème d'incomplétude de Gödel démontré en 1931, dès qu'une théorie mathématique T non contradictoire est capable de mener suffisamment de raisonnements arithmétiques (et c'est le cas de toutes les théories intéressantes), alors il existe des énoncés E qui ont un sens dans cette théorie et qui sont indécidables. Autrement dit, ni l'énoncé E lui-même, ni sa négation (non-E) ne sont démontrables dans T : la théorie est lacunaire, incomplète.



REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE d'une machine de Turing.

Plus précis, le second théorème d'incomplétude de Gödel établit que l'énoncé affirmant que la théorie T est non contradictoire est l'un des indécidables de T : une théorie n'a pas le pouvoir de démontrer d'elle-même qu'elle est non contradictoire… sauf si elle est contradictoire, auquel cas elle n'a aucun intérêt.

Ces formidables résultats de Gödel établissent que l'indécidabilité est toute proche des questions que l'on considère comme fondamentales, car la non-contradiction d'une théorie T est bien sûr la première des questions qu'on doit se poser quand on envisage cette théorie.

Cependant, ces énoncés ne sont simples que par leur sens : la non-contradiction d'une théorie est toujours assez complexe. On l'exprime souvent sous la forme : « Jamais une suite de formules obtenues en suivant les règles de raisonnement de la théorie ne conduira à la formule 0 = 1. » Or traduire une telle affirmation en un énoncé arithmétique exige qu'on traduise d'abord les règles de raisonnement de T, ce qui demande un travail délicat et long dénommé arithmétisation de la syntaxe et dont l'invention est due à Gödel.

Indécidabilité avec des énoncés simples ?

Pour évaluer la proximité de l'indécidabilité, les logiciens ont donc recherché des énoncés simples dont on puisse prouver l'indécidabilité. Récemment, de nouveaux résultats permettent d'évaluer le risque d'une rencontre avec un indécidable que certains mathématiciens considéraient comme improbable. Nous allons voir plus loin que l'énoncé concernant la fonction $s(n)$ de Radó, qui permettrait d'en connaître la valeur pour l'entier 1 919, est indécidable dans la puissante théorie classique des ensembles : $s(1\,919)$ est définitivement inconnaissable pour le mathématicien qui voudrait mener tout son travail avec la théorie classique des ensembles.

Pour expliquer ces nouveaux résultats, nous utiliserons les machines introduites par Alan Turing en 1936. Une machine de Turing est un automate qui peut se trouver dans un nombre fini d'états, par exemple l'état A, B ou C si ce nombre est 3. L'automate dispose d'un ruban découpé en cases. Sur le ruban, la tête de lecture-écriture de la machine lit et écrit des symboles qui viennent éventuellement effacer des symboles déjà inscrits. La machine n'a accès qu'à une seule case à la fois et déplace sa tête de lecture-écriture d'une case dans un sens ou dans l'autre. Elle parcourt ainsi le ruban pour y opérer un calcul.

Le programme de la machine est une liste finie d'instructions. Chacune est du type [A 0→1 droite B] qui signifie : « Quand je suis dans l'état A, que je lis 0 dans la case que je suis en train d'examiner, alors j'écris 1 dans cette case, je déplace la tête de lecture-écriture d'une case vers la droite et je passe dans l'état B. »

Le castor affairé à 3 états

Un castor affairé à *n* états est une machine de Turing à *n* états qui fonctionne le plus longtemps possible (pour une machine à *n* états) et qui s'arrête.
Le programme du castor affairé à 3 états comporte 6 instructions. Il a été trouvé par Tibor Radó. Il écrit cinq « 1 » successifs et fonctionne 21 fois avant de s'arrêter.
Aucune machine de Turing à 3 états ne fonctionne plus de 21 fois avant de s'arrêter, sauf si elle ne s'arrête jamais.

Les 6 instructions du programme du castor affairé à 3 états sont les suivantes :

[A 0→1 droite B],
[A 1→1 droite ARRÊT],
[B 0→1 gauche B],
[B 1→0 droite C],
[C 0→1 gauche C]
[C 1→1 gauche A].

Voici comment il faut lire ce programme et le faire fonctionner. La machine *(comme celle schématisée page ci-contre)* est posée sur un ruban recouvert de 0 doublement infini (vers la droite et vers la gauche). Supposons-la dans l'état A, et que sa tête de lecture-écriture lit un 0. L'instruction à appliquer est donc la première instruction [A 0→1 droite B] de son programme, qui indique que le 0 lu doit être remplacé par un 1, que la tête de lecture-écriture doit se déplacer d'une case vers la droite, et que le nouvel état de la machine doit être B. On a ainsi, en supposant que la machine débute sa lecture à la quatrième case et en marquant en rouge la position de la tête de lecture-écriture :

État initial

A - 0000000000000000000000000…,

État atteint

B - 0001000000000000000000000…

La machine est maintenant dans l'état B et lit un 0. Elle applique donc la 3e instruction [B 0→1 gauche B], ce qui conduit à la situation :

B - 0001100000000000000000000…

Le calcul se poursuit alors. Voici l'ensemble du calcul jusqu'à l'arrêt :

A - 0000000000000000000000000…
B - 0001000000000000000000000…
B - 000110000000000000000000…
C - 000010000000000000000000…
A - 000010000000000000000000…
B - 000110000000000000000000…
C - 000100000000000000000000…
C - 000101000000000000000000…
C - 000111000000000000000000…
A - 000111000000000000000000…
B - 001111000000000000000000…
C - 001011000000000000000000…
A - 001011000000000000000000…
B - 001111000000000000000000…
C - 001101000000000000000000…
A - 001101000000000000000000…
B - 001111000000000000000000…
C - 001110000000000000000000…
C - 001110100000000000000000…
C - 001111100000000000000000…
A - 001111100000000000000000…
ARRÊT - 0011111000000000000000…

Considérons la machine M à 2 états A et B, et dont les instructions sont [A 0→0 droite A], [A 1→0 droite A] et [A 2→0 gauche B]. Quand on place la tête de lecture-écriture de M au début d'un ruban comportant par exemple 0101101020010..., alors M parcourt le ruban de gauche à droite en remplaçant les 1 par des 0, puis, arrivée au 2, elle recule d'une case et s'arrête, car il n'y a aucune instruction lui indiquant ce qu'elle doit faire quand elle se trouve dans l'état B.

Si on place cette machine sur un ruban infini ne comportant que des 0 et des 1, elle le parcourt vers la droite sans jamais s'arrêter en remplaçant les 1 par des 0. La machine de Turing peut ainsi s'engager dans un calcul infini.

L'état A dans lequel on place la machine au démarrage est l'« état de départ ». Un état comme l'état B de notre exemple, auquel ne correspond aucune instruction, est l'« état d'arrêt ».

Quand on compte les états d'une machine de Turing, on convient de ne pas compter l'état d'arrêt. La machine que nous avons donnée en exemple est, selon cette convention, une machine à un état. Sauf exception, nous ne considérerons que des calculs de machines de Turing commençant sur un ruban (potentiellement infini) entièrement couvert de 0, et nous supposerons que les machines n'utilisent que les deux symboles 0 et 1.

Les machines de Turing qui calculent le plus longtemps

Pour chaque entier positif *n*, il existe une machine de Turing à *n* états record, c'est-à-dire telle qu'aucune autre machine à *n* états n'utilisant que les symboles 0 et 1 ne calcule plus longtemps, sauf celles qui ne s'arrêtent jamais. Le nombre de mouvements de ce calcul record est noté *s*(*n*).

Les résultats connus à ce jour sont :
$s(1)=1$; $s(2)=6$; $s(3)=21$ (Lin et Radó, 1965) ;
$s(4)=107$ (Brady, 1975) ; $s(5)\geq 47\,176\,870$ (Marxen et Buntrock, 1990) ;
$s(6)\geq 7{,}4\times 10^{36\,534}$ (Kropitz, 2010) ;
$s(7)>10^{10^{10^{10^{10^{7}}}}}$ (Wythagoras, 2014).

Nous avons indiqué ci-dessous les programmes de quelques machines record, que l'on dénomme « castors affairés ». En écrivant un programme d'exécution sur ordinateur qui simule une machine de Turing, on vérifie facilement le nombre d'étapes (égal au nombre de déplacements de la tête de lecture-écriture de la machine de Turing).

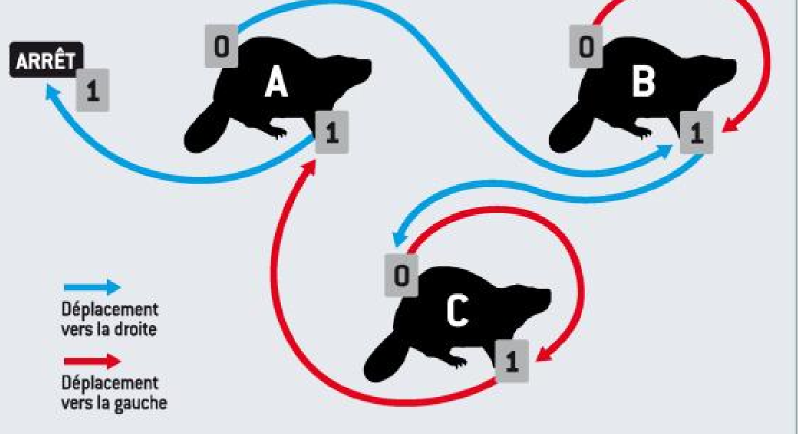
Le castor affairé à 2 états s'arrête en 6 étapes après avoir écrit quatre « 1 ». Son programme :
[A 0→1 droite B],
[A 1→1 gauche B],
[B 0→1 gauche A],
[B 1→1 droite ARRÊT].

Le castor affairé à 3 états s'arrête en 21 étapes après avoir écrit cinq « 1 ». Son programme :
[A 0→1 droite B],
[A 1→1 droite ARRÊT],
[B 0→1 gauche B],
[B 1→0 droite C],
[C 0→1 gauche C],
[C 1→1 gauche A].

Le castor affairé à 4 états s'arrête en 107 étapes après avoir écrit treize « 1 ». Son programme :
[A 0→1 droite B],
[A 1→1 gauche B],
[B 0→1 gauche A], [B 1→0 gauche C], [C 0→1 droite ARRÊT],
[C 1→1 gauche D], [D 0→1 droite D], [D 1→0 droite A].

Le castor affairé à 5 états, record actuel, s'arrête en 47 176 870 étapes après avoir écrit 4 098 « 1 ». Son programme :
[A 0→1 gauche B], [A 1→1 droite C], [B 0→1 gauche C],
[B 1→1 gauche B], [C 0→1 gauche D], [C 1→0 droite E],
[D 0→1 droite A], [D 1→1 droite D], [E 0→1 gauche ARRÊT],
[E 1→0 droite A].

En mai et juin 2016, une série de travaux ont conduit à la conclusion que le nombre $s(1919)$ était indécidable dans la théorie des ensembles. Cela signifie qu'aucun raisonnement mené dans cette théorie ne permet de démontrer la formule $s(1919)=k$ avec la bonne valeur de k, laquelle est pourtant parfaitement et clairement définie.



REPRÉSENTATION GRAPHIQUE de l'algorithme du castor affairé à 3 états.

On comprend sans mal qu'une machine simple, avec peu d'états et peu d'instructions, placée sur un ruban couvert uniquement de 0, va soit s'engager dans un calcul infini (par exemple parcourir le ruban en changeant les 0 en 1, ou osciller entre deux cases sans rien y faire), soit calculer un petit moment puis s'arrêter. Une machine simple produit soit un calcul infini, soit un calcul court, et on verra que c'est justement ce qui pose un défi aux mathématiciens et les expose aux formes les plus élémentaires d'indécidabilité.

En 1962, le mathématicien hongrois Tibor Radó s'est intéressé au nombre maximal, noté $s(n)$, de mouvements qu'exécute une machine de Turing à n états avant de s'arrêter (dans le cas où elle s'arrête).

Les castors affairés

Les machines M à n états qui atteignent ce maximum sont dénommées « castors affairés ». Le nombre $s(n)$ est un nombre parfaitement défini, puisqu'il n'y a qu'un nombre fini de machines à n états n'utilisant que les symboles 0 et 1. Le nombre de machines à n états a d'ailleurs été déterminé : il est égal à $(4n+4)^{2n}$.

Pour calculer $s(n)$ pour un n donné, il suffit de faire fonctionner toutes les machines à n états en repérant celles qui calculent le plus longtemps et s'arrêtent. Avec les incroyables ordinateurs dont nous disposons, il semblerait facile d'obtenir rapidement les valeurs de $s(n)$.

Grave erreur ! Aujourd'hui, malgré de considérables efforts, on ne connaît que $s(1)=1$, $s(2)=6$, $s(3)=21$ et $s(4)=107$. On sait aussi que $s(5) \geqslant 47\,176\,870$, et que $s(6) \geqslant 7{,}4 \times 10^{36\,534}$, mais personne n'est certain que ces valeurs sont définitives. Pourquoi est-il si difficile d'évaluer $s(n)$?

La raison est double. D'abord, le nombre de machines à n états augmente très rapidement quand n augmente et on ne sait guère faire mieux, pour calculer $s(n)$, que de les prendre une à une. Ensuite, et c'est encore plus ennuyeux, les machines qui ne s'arrêtent pas sont délicates à traiter. Il faut en effet raisonner sur leurs instructions ou leur comportement pour être sûr qu'elles ne s'arrêtent pas. Pour certaines, c'est facile, mais on tombe rapidement sur des machines dont le comportement est complexe et dont on n'arrive pas à déterminer si elles s'arrêteront et donc si elles interviennent pour la détermination de $s(n)$, ou si elles poursuivent indéfiniment leurs calculs – auquel cas elles sont sans importance pour $s(n)$. On sait par ailleurs qu'aucune méthode algorithmique générale ne permet de répondre à la question. C'est la fameuse indécidabilité de l'arrêt démontrée par Turing en 1936 : aucun algorithme ne peut déterminer, pour toute machine de ce type placée sur un ruban ne comportant que des 0, si oui ou non elle finira par s'arrêter.

Une conséquence de ce résultat, qui est la raison de l'introduction par Radó de sa fonction $s(n)$, est que $s(n)$ n'est pas calculable par algorithme. Plus intéressant

Les castors affairés calculent l'entropie

La connaissance des valeurs de la fonction $s(n)$ de Radó, dont il vient d'être démontré que $s(1919)$ est indécidable, est utile pour certains calculs fondamentaux de la théorie de la complexité. En utilisant la valeur conjecturée comme la bonne pour $n=5$, $s(5)=47\,176\,870$, une équipe réunie autour de Fernando Soler-Toscano a calculé l'entropie algorithmique, qui généralise l'entropie statistique de Shannon, des suites courtes de 0 et de 1.

Cette entropie est aussi nommée complexité de Kolmogorov : pour une suite donnée, c'est la taille du plus court programme qui produit la suite. Plus une suite est complexe, plus son entropie algorithmique est grande (*voir l'article indiqué en bibliographie de F. Soler-Toscano et al.*). La méthode est la suivante. On fait calculer chacune des 26 559 922 791 424 (26 000 milliards) machines de Turing à 5 états jusqu'à ce qu'elle s'arrête où jusqu'à l'étape $s(5)$, ce qui signifie que la machine ne s'arrête jamais. Le nombre k de fois où est obtenue une suite donnée (par exemple la suite $t=01010$) est directement lié à son entropie algorithmique $K(t)$ par une formule de Leonid Levin, $K(t) \approx -\log_2[k/N(5)]$, où $N(5)$ désigne le nombre de machines à 5 états, et donne donc une valeur approchée de l'entropie.

La formule de Leonid Levin est remarquable et très profonde. Elle signifie que les suites complexes (c'est-à-dire celles dont le plus court programme de création est long) sont aussi celles qu'une machine tirée au hasard produit avec la plus faible probabilité.

Quelques valeurs ainsi obtenues sont présentées ci-dessous.

SUITE	FRÉQUENCE	ENTROPIE
1	0,175036	2,51428
0	0,175036	2,51428
11	0,0996187	3,32744
10	0,0996187	3,32744
01	0,0996187	3,32744
00	0,0996187	3,32744
111	0,0237546	5,3962
000	0,0237546	5,3962
110	0,0229434	5,44578
100	0,0229434	5,44578
011	0,0229434	5,44578
001	0,0229434	5,44578
101	0,0220148	5,5038
010	0,0220148	5,5038
1111	0,0040981	7,03083
0000	0,0040981	7,03083
1110	0,00343136	8,187
1000	0,00343136	8,187
0111	0,00343136	8,187
0001	0,00343136	8,187

Des machines pour Goldbach et Riemann

Tout comme on peut envisager d'écrire explicitement une machine de Turing qui recherche une contradiction dans la théorie des ensembles ZFC et qui n'en trouvera pas, on peut expliciter une machine de Turing qui recherche un contre-exemple à la conjecture de Goldbach, c'est-à-dire un entier pair supérieur à 2 qui ne s'écrit pas comme somme de deux nombres premiers.

Une telle « machine de Goldbach » ne s'arrête que si la conjecture de Goldbach est fausse. Le nombre d'états de cette machine de Turing qu'on tente de rendre le plus petit possible est une mesure de la difficulté de la conjecture. Le record obtenu tout récemment est 47. Une machine à 27 états est en cours de vérification (www.scottaaronson.com/blog/?m=201605).

L'hypothèse de Riemann est une conjecture centrale de la théorie des nombres, formulée en 1859 par le mathématicien allemand Bernhard Riemann. Elle énonce que les zéros non triviaux de la fonction zêta de Riemann ont tous pour partie réelle 1/2 et donne des précisions sur la densité des nombres premiers.

On recherche des machines de Turing qui ne s'arrêtent que si la conjecture est fausse. La plus petite connue aujourd'hui est à 744 états. Si la conjecture de Riemann est indécidable dans ZFC (c'est une éventualité parfois envisagée), on pourra alors affirmer que $s(744)$ est indécidable dans ZFC, ce qui serait un progrès.

De même, si la conjecture de Goldbach se révélait indécidable dans ZFC, on saurait alors que $s(47)$ est indécidable dans ZFC.

encore, cette fonction croît plus rapidement que n'importe quelle fonction calculable par algorithme.

Voici le raisonnement de Radó. Soit $f(n)$ une fonction calculable par algorithme dont on suppose qu'elle majore $s(n)$, c'est-à-dire que pour tout entier n, $f(n) \geqslant s(n)$. En l'utilisant, on pourrait savoir par algorithme si une machine donnée M à n états s'arrête ou non. En effet, on calcule $f(n)$, puis on calcule $f(n)$ étapes du fonctionnement de M ; si M s'est arrêtée pendant ces $f(n)$ étapes, c'est qu'elle s'arrête, sinon c'est qu'elle ne s'arrête jamais, par définition de $s(n)$. Une fonction calculable par algorithme et qui majore $s(n)$ ne peut donc pas exister. Autrement dit : pour toute fonction $f(n)$ calculable par algorithme, il existe un n tel que $f(n) < s(n)$. Sans beaucoup d'effort, on montre même qu'il existe une infinité de n tels que $f(n) \leqslant s(n)$, et en outre que c'est le cas pour tous les entiers à partir d'une certaine valeur.

Voyons maintenant le rapport entre cette fonction de Radó et la théorie des ensembles, ce qui nous mènera aux nouveaux indécidables courts découverts il y a quelques mois.

Des indécidables grâce à la fonction de Radó

La théorie des ensembles permet de représenter pratiquement tous les objets mathématiques et tous les raisonnements qu'on fait avec eux. Sa version la plus utilisée (par exemple dans le traité *Éléments de mathématique*, de Nicolas Bourbaki) est notée ZFC, pour « Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix » (Ernst Zermelo et Abraham Fraenkel sont deux mathématiciens qui ont contribué à sa définition). L'axiome du choix stipule que pour toute famille F d'ensembles non vides et disjoints deux à deux, par exemple $\{\{a\}, \{1, 2, 3\}, \{X, Y\}, \{p, q, r, s\}\}$, il existe un ensemble C de « choix » contenant un élément exactement de chaque ensemble de F ($C = \{a, 2, X, r\}$ conviendrait pour notre exemple). Depuis un siècle qu'on utilise ZFC, on n'y a jamais trouvé de contradiction et nous supposerons qu'il n'y en a pas.

On montre que lorsqu'une fonction $f(n)$ n'est pas calculable par algorithme, la théorie des ensembles ZFC ne peut pas en connaître certaines valeurs. Autrement dit il existe au moins un entier n tel que l'énoncé $f(n) = k$ qui en donne la valeur est un indécidable de ZFC. C'est vrai aussi pour n'importe quelle autre théorie non contradictoire utilisée à la place de ZFC, mais bien sûr pas nécessairement avec le même entier n.

Concernant la fonction $s(n)$ de Radó, on sait donc depuis 1962 qu'avec la théorie ZFC, il existe au moins un entier n_0 tel qu'on ne peut déterminer la valeur de $s(n_0)$: l'énoncé $s(n_0) = k$, pour la bonne valeur de k, n'est pas démontrable dans ZFC, et sa négation non plus. La théorie ZFC est impuissante pour $s(n_0)$, qui échappe à son pouvoir déductif.

La question que se sont récemment posée Scott Aaronson, professeur au MIT, et Adam Yedidia, l'un de ses étudiants, est la suivante : est-ce que ce n_0 qui marque l'impuissance de ZFC vaut 10, 1 000, 100 milliards ou autre chose ? Répondre en proposant une valeur aussi petite que possible de n_0 est une façon parfaitement concrète de mesurer la proximité des indécidables de ZFC.

Le résultat auquel ils sont parvenus est que $s(7\,918)$ échappe à ZFC : jamais un mathématicien travaillant avec la théorie classique des ensembles ne pourra connaître $s(7\,918)$. Dit autrement, parmi les machines de Turing à 7 918 états qui ne s'arrêtent pas, certaines le font pour des raisons que la théorie n'est pas capable d'analyser. C'est la première fois qu'on réussit à avoir une précision de ce type sur l'indécidabilité dans la théorie des ensembles.

Chose amusante, ce travail, rendu public en mai 2016, a aussitôt suscité d'autres travaux sur la même question, lesquels ont abouti à son amélioration. Stefan O'Rear a établi dans un premier temps que $s(5\,349)$ échappe à ZFC, résultat encore amélioré quelques jours plus tard pour arriver cette fois à la démonstration que $s(1\,919)$ est hors d'atteinte de ZFC.

Désormais, personne ne pourra plus dire que les indécidables de la théorie des

ensembles ne concernent que des problèmes alambiqués et si complexes qu'aucun mathématicien ne s'y intéressera jamais de lui-même : s'interroger sur $s(1\,919)$ est naturel, car cela concerne la partie la plus élémentaire de la théorie mathématique du calcul…

Notons que ce record $n_0 = 1\,919$ est sans doute améliorable, car, comme le savent bien ceux qui tentent de connaître les valeurs de $s(n)$, les difficultés concrètes commencent dès $s(5)$, qui reste inconnu à ce jour. Une bonne marge de travail est donc disponible entre 5 et 1 919, marge que l'on réduira soit en progressant dans le calcul des $s(n)$, soit en réussissant à prouver l'indécidabilité d'énoncés de la forme $s(n) = k$ pour des valeurs encore plus petites que $n_0 = 1\,919$.

La machine Z ne s'arrête jamais

La méthode utilisée par Adam Yedidia et Scott Aaronson est intéressante. L'idée la plus naturelle serait de mettre en œuvre les techniques d'arithmétisation de la syntaxe de Gödel et donc de construire une machine de Turing M qui recherche une contradiction dans ZFC en énumérant toutes les démonstrations de ZFC et en tentant d'y reconnaître une preuve de l'énoncé « 0 = 1 ». Une telle machine ne trouvera pas de contradiction, et pourtant ZFC ne pourra pas le démontrer (sinon, cela signifierait que ZFC démontre qu'elle n'est pas contradictoire, ce que le second théorème d'incomplétude de Gödel interdit). Cependant, cette méthode par l'arithmétisation de la syntaxe conduirait à une machine de Turing à plusieurs centaines de milliers d'états, voire des millions, et l'on ne démontrerait donc l'indécidabilité de $s(n) = k$ que pour un n très grand.

La méthode utilisée par Scott Aaronson et Adam Yedidia évite cette explosion du nombre d'états de la machine de Turing dont ZFC ne peut prouver le non-arrêt. Elle se fonde sur des travaux récents de Harvey Friedman, de l'université d'État de l'Ohio, qui élabore depuis des années des énoncés d'arithmétiques indécidables dans ZFC ou d'autres théories. L'un d'eux concerne une propriété des graphes et cette propriété, trop abstraite pour être décrite ici, est équivalente à celle exprimant la non-contradiction de ZFC. Cette propriété s'écrit assez facilement en termes arithmétiques et la machine, notée Z, qui cherche un contre-exemple à cet énoncé est donc relativement simple comparée à celle qu'on aurait obtenue par arithmétisation de la syntaxe : elle énumère des séries d'entiers et effectue des tests sur eux. Le fait que Z ne s'arrête pas dans cette recherche de contre-exemple est nécessairement un indécidable de ZFC, sinon, encore une fois, ZFC démontrerait d'elle-même qu'elle est non contradictoire.

Soit n_0 le nombre d'états de Z. Puisque pour connaître $s(n_0)$, ZFC doit savoir prouver le non-arrêt de chaque machine à n_0 états qui ne s'arrête pas, il en résulte que ZFC ne peut pas démontrer $s(n_0) = k$ pour la bonne valeur k. Précisons que la propriété en question des graphes est démontrable dans une théorie un peu plus forte que ZFC, et donc qu'on a toutes les raisons de la croire vraie. Notons aussi qu'une fois leur machine Z programmée, Scott Aaronson et Adam Yedidia l'ont effectivement lancée pour voir si elle s'arrêtait ; au bout de plusieurs heures, elle ne s'était pas arrêtée.

Sans effort particulier, utiliser ce raccourci déduit des travaux de Friedman n'aurait cependant pas permis à lui seul d'arriver aux petites valeurs de n_0 aujourd'hui connues. Scott Aaronson et Adam Yedidia ont, et c'est la seconde idée originale de leur travail, conçu un langage informatique nommé Laconic permettant d'exprimer la propriété de Friedman de manière concise. Ils ont aussi écrit et utilisé le traducteur des programmes écrit en Laconic qui en tire des machines de Turing du type considéré par Radó. C'est ainsi qu'ils ont obtenu la machine de Turing Z à 7 918 états qui ne s'arrête jamais, mais dont ZFC ne peut pas démontrer qu'elle ne s'arrête jamais. Le passage de 7 918 états à 1 919 états s'est fait en améliorant le langage et les opérations de transformation des programmes en machines de Turing.

Saura-t-on faire encore mieux et trouver des valeurs encore plus petites que le $n_0 = 1\,919$ d'aujourd'hui ? C'est probable, et peut-être qu'à l'heure où vous lirez ce texte, le record sera déjà battu. Pour le savoir, consultez le blog de Scott Aaronson ! ■

■ **L'AUTEUR**



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

■ **BIBLIOGRAPHIE**

S. Aaronson, **The 8000th Busy Beaver number eludes ZF set theory : New paper by Adam Yedidia and me**, blog de mai 2016, www.scottaaronson.com/blog/?m=201605

H. Marxen, **List of the known Busy Beaver values**, 2016, www.drb.insel.de/ffheiner/BB/

P. Michel, **The Busy Beaver competition : A historical survey**, 2016, http://export.arxiv.org/pdf/0906.3749v4

A. Yedidia et S. Aaronson, **A relatively small Turing machine whose behavior is independent of set theory**, 2016, https://arxiv.org/pdf/1605.04343.pdf

F. Soler-Toscano *et al.*, **Calculating Kolmogorov complexity from the output frequency distributions of small Turing machines**, *PLoS One*, vol. 9(5), e96223, 2014.

C. S. Calude et E. Calude, **Evaluating the complexity of mathematical problems : Part 1 & Part 2**, *Complex Systems*, vol. 18, pp. 267-285, 2009 et pp. 387-401, 2010.



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Les parasites sont partout !

Ces organismes vivent aux dépens des autres. Souvent cachés, ils inspirent le dégoût ou la peur… les ingrédients parfaits pour des fictions horrifiques.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ **Illustration : Marc BOULAY**

Les parasites prolifèrent dans tous les écosystèmes de la Terre, mais demeurent souvent invisibles à l'œil nu. Personne n'est à l'abri de ces organismes qui prospèrent aux dépens des autres. Ainsi, ils puisent leurs ressources et leur énergie directement chez l'hôte qui les héberge ou qui leur sert de vecteur pour atteindre une nouvelle cible. Certains coévoluent avec leur hôte depuis des millions d'années. Les parasites ont ainsi développé des cycles de reproduction complexes et arborent des formes repoussantes munies de tentacules, ventouses ou redoutables crochets.

Avec ces attributs peu avenants et les maladies qu'ils provoquent, les parasites ont inspiré de nombreux auteurs de fictions horrifiques ! En outre, dans certains cas, le parasite peut même tuer son hôte, histoire d'achever son cycle de développement : il devient alors parasitoïde. Il n'est donc pas rare de croiser dans diverses œuvres des êtres parasites ou parasitoïdes très peu fréquentables.

Le plus célèbre d'entre eux est sans doute le monstre Alien, fruit de l'imagination débridée du plasticien suisse Hans Ruedi Giger (décédé en 2014), et dont les premiers stades de développement sont parasitoïdes. Un défi est de discerner chez Alien, ou chez les autres parasites de fiction, les caractères et autres attributs plausibles tant les parasites réels ont développé des morphologies et des stratégies de survie originales.



DANS *LE SOMMEIL DU MONSTRE*, bande dessinée d'Enki Bilal, le docteur Optus Warhole est une sorte de parasite manipulateur qui contrôle l'esprit de ses victimes.

Les milieux qu'ils colonisent sont un bon exemple. Peu d'endroits du corps leur échappent : la peau, les plumes, les poils (ectoparasites), le cerveau, le sang ou encore le tube digestif (endoparasites).

Dans le film *Pacific Rim* (Guillermo del Toro, 2013), les humains construisent des robots géants (les fameux « mechas ») pour lutter contre des envahisseurs titanesques issus d'un univers parallèle. Ces monstres géants (ou « kaijus », c'est-à-dire « étranges bêtes » en japonais) présentent des morphologies discutables (avec une surenchère de caractères anatomiques agressifs – cornes, dards, griffes, pinces, mandibules, etc.), mais une biodiversité intéressante. En témoigne par exemple Otachi, énorme kaiju évoquant un ptérosaure et présentant des parasites externes !

Ces sortes de gros arthropodes accrochés à la peau du monstre ne sont pas sans rappeler les cyamidés ou « poux des baleines », des crustacés marins bien réels qui squattent le cuir des gros cétacés actuels. Dans *Pacific Rim*, ces ectoparasites demeurent cependant inoffensifs, contrairement à leurs hôtes. Ce n'est pas le cas des parasites du monstre géant de *Cloverfield* (Matt Reeves, 2008) qui, eux, sont très agressifs et évoquent plutôt d'énormes amblypyges (arachnides à longues pattes munies de pinces).

Autres ectoparasites intéressants, les puces savantes de *La Cité des Enfants Perdus*, film esthétique et steampunk de Jean-Pierre Jeunet et Marc Caro (1995).



CE PARASITE MANIPULATEUR imaginaire s'installe au plus près du système nerveux de son hôte pour le contrôler. Un phénomène que l'on observe dans la nature.

Dans une ville portuaire lugubre, des enfants sont kidnappés pour tenter de soigner l'affreux Krank, qui ne peut plus rêver. Poursuivis par les méchants, les deux héros, une petite fille nommée Miette et son ami One, sont sauvés grâce à des puces munies de chélicères (ou crochets) artificiels et remplis d'une substance chimique qui transforme l'hôte en monstre sanguinaire.

Si ces parasites ont été réalisés en 3D (une prouesse technique pour l'époque), dans la nature, il existe près de 2 500 espèces de ces minuscules insectes hématophages regroupés sous le terme de siphonaptères, du latin *sipho*, tube, en référence à leur trompe rigide (ou stylet) qui leur permet de se nourrir. Les siphonaptères parasitent aujourd'hui de nombreux mammifères et quelques oiseaux, mais ils ont une origine très ancienne : une puce fossile datée du Jurassique (environ 165 millions d'années) et nommée pour cause *Pseudopulex jurassicus* a été découverte en Mongolie intérieure et aurait piqué des dinosaures à plumes et des ptérosaures !

Dans *La Cité des Enfants Perdus*, le fait que les puces savantes de Marcello, avant de toucher leur cible, soient véhiculées sur le dos de son dogue suggère qu'elles sont plutôt inféodées aux chiens et qu'elles appartiennent peut-être à l'espèce *Ctenocephalides canis*. Cette puce européenne parasite les canidés mais transmet aussi le ténia, ver solitaire qui s'installe dans l'intestin de son hôte pour s'y nourrir : un parasite peut donc en cacher un autre !

Le parasite ne se contente pas toujours de se nourrir grâce à son hôte. Il modifie parfois le développement, voire le comportement, de celui qui l'héberge : c'est le cas de la sacculine *(Sacculina carcini)*, petit crustacé qui s'attaque à un autre crustacé, le crabe. Ce parasite est d'apparence très simple : adulte, il ressemble à un petit sac qui se fixe sur l'abdomen de son hôte. Seule sa larve, plus complexe, atteste de son appartenance au groupe des crustacés.

Il contrôle votre esprit

Le « sac » de la sacculine n'est que la partie émergée de l'iceberg, car il contient uniquement le système nerveux central et les organes sexuels de l'organisme. Le reste se développe à l'intérieur de l'hôte, sous la forme de diverticules évoquant des racines ou des rhizomes (d'où le terme de rhizocéphale pour regrouper les espèces du genre) et pouvant même envahir la totalité du corps de la victime ! Ce charmant parasite à la fois interne et externe pompe les nutriments de son hôte. Il modifie aussi profondément sa croissance en bloquant ses mues, et le castre – l'hôte ne se reproduit plus !

Ce terrible cas de parasitisme dit manipulateur (bien que ce comportement ne soit pas voulu par le parasite lui-même, il est le fruit de la sélection naturelle) a-t-il inspiré le dessinateur français Enki Bilal qui met en scène, dans sa bande dessinée *Le Sommeil du monstre* (1998), le terrible docteur Optus Warhole ? Cet être polymorphe et démoniaque (il s'autoproclame d'ailleurs « incarnation du mal suprême ») parasite en effet le corps et l'esprit des personnages.

Dans certains cas, le parasite manipulateur pousse son hôte au suicide et à se faire manger par un prédateur afin d'atteindre un nouveau stade de son cycle de développement. C'est le cas de la douve du foie qui conduit son hôte, une fourmi, au sommet d'un brin d'herbe pour y être croquée par un ruminant.

Mais les parasites de la fiction ne s'attaquent pas qu'aux organismes vivants : ils peuvent s'en prendre aussi aux vaisseaux spatiaux ! Dans *Star Wars : Épisode V, L'Empire contre-attaque* (George Lucas, 1980), d'étranges parasites volants à tête en forme de ventouse, les Mynocks, parasitent le Faucon Millenium, le vaisseau de Han Solo. Ces créatures semblent autotrophes, c'est-à-dire qu'elles se nourrissent de matière inorganique, minérale ou métallique selon l'hôte.

Sur Terre, pratiquement tous les grands groupes vivants, protozoaires, bactéries, vers, arthropodes et autres, ont présenté des cas de parasitisme. De quoi inspirer encore de nombreuses œuvres de science-fiction ! ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Tous les Chinois disent I love Yu

La découverte des traces géologiques d'un déluge cataclysmique en Chine il y a quatre mille ans donne du crédit à un mythe du pays : celui du roi Yu le Grand, dompteur des flots et fondateur des Xia, la première dynastie chinoise.

Loïc MANGIN

Il était une fois un mythe. Nous sommes en Chine, il y a plus de quatre mille ans, et la légende raconte que Yu, le premier roi de la première dynastie, celle des Xia, est monté sur le trône après avoir dompté les flots qui ont submergé les terres pendant deux générations. Ce déluge est connu chez les Chinois sous le nom de Crue des Hautes Eaux. Pour son exploit, Yu fut divinisé et devint, dans le panthéon taoïste, le dieu régisseur des eaux. Ainsi porté au rang de figure tutélaire, le roi Yu, dit le Grand, a fait l'objet de nombreuses œuvres d'art, poèmes et gravures, dont celle que Totoya Hokkei a réalisée au XIX[e] siècle, pendant l'époque Edo *(voir page ci-contre)*. On y voit le monarque légendaire affronter les flots tumultueux symbolisés sous la forme d'un dragon.

Les inondations auraient commencé sous le règne de l'empereur Yao. Lequel donna l'ordre à Gun, le père de Yu, d'y remédier. Hélas, la méthode qu'il choisit, à savoir l'érection de digues et de barrages, échoua. Même l'emploi de Xirang, un matériau magique qui a la réputation de se dilater à volonté et qu'il déroba aux dieux, ne put rien contre la rage des eaux. On déplora encore de nombreuses victimes, notamment Gun lui-même que Shun, le successeur de Yao, condamna. Le salut vint de Yu.

Lui préféra faire creuser de très nombreux canaux, des travaux gigantesques qui ont duré plusieurs années, de façon à diriger les flots et épargner habitations et populations. On raconte que Hebo, le dieu du fleuve Jaune, aida Yu en lui fournissant une carte de la rivière et de ses environs.

Ce fut un tel succès que Shun préféra Yu à son fils pour lui succéder ! Ainsi s'installa la dynastie Xia (pour quelque cinq siècles), car Yu instaura le principe de la transmission héréditaire du pouvoir. Ce mythe s'interprète également comme celui de la transition de la civilisation chinoise vers une société agricole grâce à la maîtrise de l'eau.

Le fleuve serait resté bloqué six à neuf mois, le temps qu'environ 12 à 17 kilomètres cubes d'eau s'accumulent derrière le barrage

Quelle est la part de vérité dans ce mythe ? Yu a-t-il réellement existé ? Les historiens en débattent depuis longtemps. Aucune mention du roi vainqueur des eaux n'a été retrouvée dans les vestiges archéologiques datant de l'époque où il est censé avoir vécu (de 2200 à 2101 avant notre ère). La première mention de son nom date de la période des Zhou de l'Ouest, plus de mille ans après son supposé règne.

La situation a évolué avec les récentes découvertes de Qinglong Wu, de l'université de Pékin, et ses collègues. Leurs trouvailles donnent du crédit à l'idée d'un déluge il y a près de quatre mille ans. Ces chercheurs ont cartographié des sédiments lacustres et ont daté ces derniers ainsi que les restes de trois humains ensevelis. Les résultats révèlent qu'un glissement de terrain dû à un séisme en 1920 avant notre ère a endigué le fleuve Jaune dans les gorges Jishi, situées sur le bord du plateau tibétain, dans ce qui est aujourd'hui la province du Qinghai. Le cours serait resté bloqué six à neuf mois, le temps qu'environ 12 à 17 kilomètres cubes d'eau s'accumulent derrière le barrage inopiné. Et ce dernier céda... entraînant l'inondation de la grande plaine du nord de la Chine, le berceau de la civilisation du pays. On imagine comment l'événement a pu frapper l'esprit des populations qui en ont été les témoins !

Les auteurs de l'étude ont remarqué que ce déluge est concomitant au changement de lit du fleuve, qui s'est frayé un nouveau cours. Par ailleurs, ce cataclysme coïncide avec une transition culturelle majeure, celle qui fit passer la Chine du néolithique à l'âge du Bronze. La culture Erlitou, qui marque ce passage pour les archéologues, correspond peut-être à la dynastie mythique Xia.

La Crue des Hautes Eaux rejoindrait ainsi la liste des déluges mythiques qui auraient un soubassement historique (c'est le cas de celui de la Bible). Et Yu ? On raconte que, quand la légende est plus belle que l'histoire, on publie la légende. Puisque cette fois les deux se rejoignent... ■

Q. Wu *et al.*, **Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty**, *Science*, vol. 353, pp. 579-582, 2016.



William Sturgis Bigelow Collection

IDÉES DE PHYSIQUE

Quand la chaleur devient électricité

Au sein des matériaux conducteurs, le transport d'énergie et celui des charges électriques sont liés. L'effet Seebeck, où un écart de températures engendre un courant électrique, en est une conséquence. Il permet de concevoir des moteurs d'un type nouveau.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Finale 2013 du Google Science Fair, le concours international scientifique et technologique organisé par Google pour les 13-18 ans : Ann Makosinski, une adolescente canadienne de 16 ans, reçoit un prix pour la conception d'une lampe de poche qui puise son énergie uniquement dans la chaleur de la paume de la main. Le cœur de son dispositif est constitué par des modules thermoélectriques, qui permettent de générer de l'électricité à partir d'une différence de température – ici entre la peau et l'air ambiant. Comment fonctionnent ces éléments et peut-on en envisager une utilisation moins anecdotique ?

En 1834, le physicien français Jean-Charles Peltier a mis en évidence un effet surprenant associant électricité et chaleur et qui a, depuis, pris son nom. Lorsqu'un courant électrique traverse une soudure reliant deux métaux différents, cette dernière absorbe ou dégage de la chaleur, selon le sens du courant.

Machines thermiques sans éléments mobiles

Dans ce phénomène, la puissance thermique absorbée ou dégagée est proportionnelle à l'intensité du courant. L'effet Peltier diffère donc de l'effet Joule, qui consiste en un dégagement de chaleur dont la puissance est proportionnelle au carré de l'intensité.

Grâce à l'effet Peltier, on peut réaliser une machine thermique très fiable, sans pièce mobile ni écoulement de fluide. Il suffit de construire un circuit électrique fermé où se succèdent un fil d'un métal A, un fil d'un métal B, un fil d'un métal A et une source de tension électrique. Lorsque le courant circule, une soudure s'échauffe tandis que l'autre se refroidit. Las, les performances en termes de flux thermique étant limitées, l'utilisation de tels modules à effet Peltier a été réservée à des applications particulières, notamment en réfrigération.

L'effet Peltier : un dégagement ou une absorption de chaleur au niveau d'une soudure traversée par un courant

Comment s'explique l'effet Peltier ? Au sein des métaux, des électrons dits de conduction sont libres de se déplacer, ce qui rend aisément possible le passage d'un courant électrique. À basse température, les électrons remplissent successivement tous les niveaux d'énergie disponibles à partir du niveau le plus bas. L'énergie maximale atteinte, appelée énergie de Fermi, dépend du matériau. Que se passe-t-il alors quand on met en contact deux métaux différents ? Des électrons passent du métal où les énergies sont les plus élevées à celui où les énergies sont plus basses, jusqu'à ce que les deux niveaux les plus hauts s'égalisent. Autrement dit, l'un des matériaux se charge positivement, tandis que l'autre se charge négativement. Ce transfert de charges, produit par le simple contact des deux métaux, crée ainsi une différence de potentiel électrique, de l'ordre du volt : c'est l'effet Volta.

Et si la température n'est pas très basse ? Dans ce cas, certains électrons sont excités thermiquement, c'est-à-dire qu'ils quittent leur niveau initial pour occuper un niveau d'énergie supérieure au niveau de Fermi. Ces excitations et la façon dont se répartissent en énergie les électrons au-dessus du niveau de Fermi dépendent de la nature du métal. Quand on force le transfert d'électrons d'un métal à l'autre en imposant un courant électrique, l'énergie moyenne des électrons change et il apparaît une discontinuité dans le courant d'énergie au niveau du contact, équivalente à une différence de potentiel de l'ordre du millivolt. Cette discontinuité se traduit par un dégagement ou une absorption de chaleur, dont la puissance est proportionnelle au nombre de charges qui passent, donc à l'intensité. C'est l'effet Peltier.

Cette interprétation microscopique nous éclaire sur un effet inverse : la production d'un courant à partir d'une différence de température. Prenons un fil de métal et portons ses extrémités à des températures différentes. Du côté chaud, les électrons libres seront plus excités thermiquement

■ LES AUTEURS




Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.
Leur blog : www.scilogs.fr/
idees-de-physique

que du côté froid ; ils auront donc un écart moyen d'énergie, par rapport au niveau de Fermi, plus élevé : spontanément, ils s'écouleront du chaud vers le froid.

Dans un fil isolé, ce transfert de charges provoqué par l'écart de températures fait apparaître une différence de potentiel qui augmente jusqu'à ce que le champ électrique qui en résulte stoppe les mouvements des charges. Avec un fil fait d'un autre matériau, la différence de potentiel produite atteint une autre valeur. Par conséquent, si l'on boucle le circuit des deux fils, la différence de potentiel totale au bout d'un tour du circuit n'est pas nulle : un courant circule donc.

L'effet Seebeck, inverse de l'effet Peltier

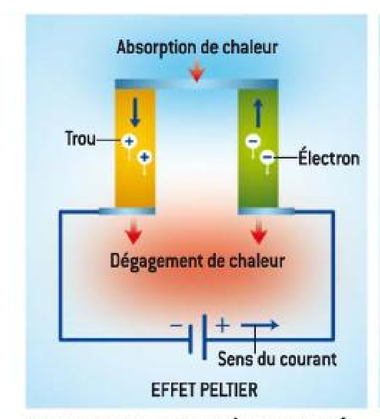
Ainsi, on obtient un générateur électrique juste en portant les soudures des deux fils à des températures différentes. C'est l'effet Seebeck, découvert par le physicien allemand Thomas Seebeck en 1823, une dizaine d'années avant la mise en évidence de l'effet Peltier.

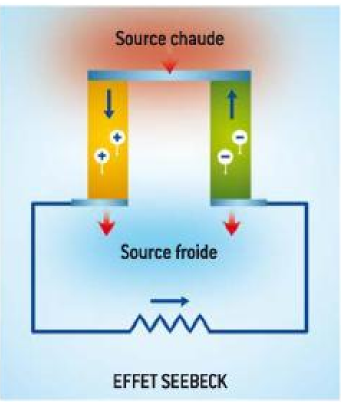
On peut tirer profit de l'effet Seebeck pour concevoir des modules thermoélectriques qui génèrent de l'électricité à partir de deux sources de chaleur de températures différentes. L'efficacité de ces modules ne dépend que d'une grandeur unique, le « facteur de mérite », lequel est proportionnel au pouvoir thermoélectrique du matériau divisé par le produit de sa résistivité électrique et de sa conductivité thermique. La tentation est grande de prendre des métaux, très conducteurs, donc de faible résistivité. Malheureusement, leur pouvoir thermoélectrique est faible et leur conductivité thermique élevée.

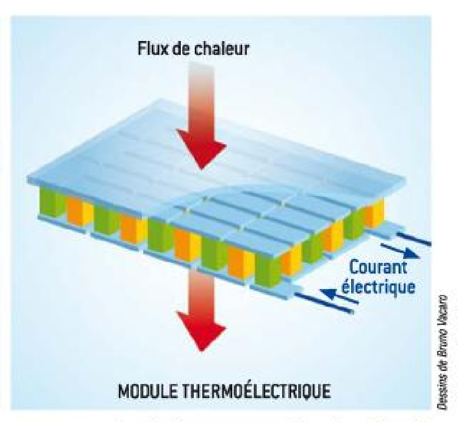
En fait, ces trois grandeurs – pouvoir thermoélectrique, résistivité électrique et conductivité thermique – ne sont jamais indépendantes, car elles sont intimement liées à la structure électronique du matériau. Les recherches dans ce domaine restent donc très actives pour trouver le meilleur compromis en fonction des conditions d'utilisation, notamment la température.

Bien souvent, les modules sont constitués de semi-métaux ou de semi-conducteurs fortement dopés. L'un des deux éléments du module est un matériau dopé de type n, où la conduction est assurée par les électrons (de charge négative, d'où le « n »), l'autre de type p, où la conduction est assurée par les trous, de charge positive (un trou correspond à l'absence d'un électron), et où le pouvoir thermoélectrique est de signe opposé. En les associant, on obtient la boucle de courant souhaitée *(voir la figure ci-dessous)*.

Les sondes spatiales qui s'éloignent trop du Soleil pour que les panneaux photovoltaïques

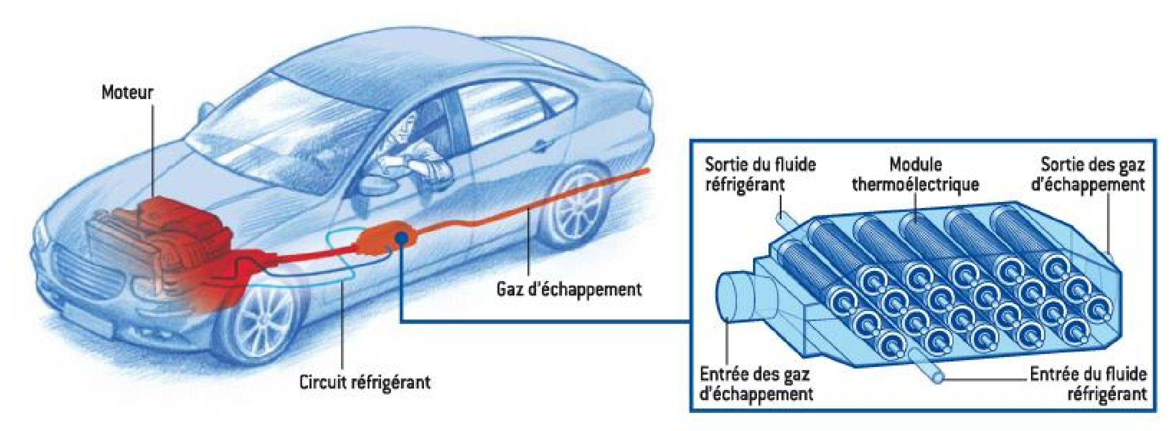






Dessins de Bruno Vacaro

L'EFFET PELTIER PEUT ÊTRE UTILISÉ comme un effet réfrigérant *(à gauche)* : traversée par un courant électrique, la jonction entre deux barreaux faits de semi-conducteurs différents absorbe de la chaleur, laquelle est évacuée aux autres extrémités des barreaux. L'effet Seebeck, son inverse, permet de générer un courant électrique à partir de deux sources de chaleur de températures différentes *(au milieu)*. En regroupant plusieurs circuits identiques, on construit des modules thermoélectriques fonctionnant selon l'un ou l'autre mode *(à droite)*.



CERTAINS CONSTRUCTEURS AUTOMOBILES cherchent à récupérer la chaleur des gaz d'échappement pour générer de la puissance électrique. L'un des dispositifs proposés fait appel à des modules thermoélectriques cylindriques, dont la paroi extérieure est au contact des gaz chauds, tandis que l'axe central du cylindre est parcouru par un fluide réfrigérant.

puissent fonctionner sont équipées de tels générateurs thermoélectriques. Il s'agit de générateurs à radio-isotopes, où la source chaude est constituée par une pastille radioactive, tandis que la source froide est un radiateur rayonnant vers l'espace.

Récupérer la chaleur inutilement perdue

Le calcul montre qu'avec un facteur de mérite égal à 1, valeur typique de nos jours, et avec une différence de température entre les sources de l'ordre de 300 °C (respectivement 25 °C), on peut obtenir de l'ordre de 8 % (respectivement 1 %) du rendement théorique attendu pour un moteur, le rendement de Carnot, très loin des efficacités des moteurs classiques. Cela demeure modeste, mais les applications ne manquent pas.

Par exemple, pourquoi ne pas récupérer la chaleur du corps que nous dissipons à travers notre peau en pure perte dans l'air environnant ? Bien avant la lampe de poche d'Ann Makosinski, on a ainsi vu apparaître en 1982 une montre thermoélectrique, le modèle Thermatron de chez Bulova. D'autres montres thermoélectriques ont suivi au tournant des années 2000. Le modèle de chez Citizen avait sa pile alimentée par un ensemble de plus de 1 000 couples, délivrant une puissance de 14 microwatts et une tension de 500 millivolts par degré Celsius d'écart de température. Les projets fleurissent toujours, sans aboutir à la commercialisation, tels que le bracelet thermoélectrique de Dyson (2009) pour alimenter téléphones ou tablettes. La limitation réside dans le faible écart de températures : 25 °C d'écart à 10 °C, c'est un rendement de Carnot de 8 %, donc une efficacité de conversion inférieure à 0,1 % !

Une piste prometteuse concerne les automobiles *(voir la figure ci-dessus)*. Près des deux tiers de la puissance d'une voiture à essence sont *in fine* dissipés sous forme de chaleur, dont un petit tiers dans le système d'échappement. Ainsi, une voiture qui en une heure consomme 7 litres de carburant évacue près de 20 kilowatts dans ses gaz d'échappement.

Or la température de ces gaz peut atteindre 700 °C. S'ils passent par des modules thermoélectriques dont la partie froide est maintenue à 100 °C par un fluide réfrigérant (l'air ambiant ne suffirait pas), on obtient un écart de températures de 600 °C et un très bon rendement de Carnot : 62 %. Même avec des modules peu coûteux, il est ainsi possible de générer quelque 200 watts de puissance électrique. Le recyclage de celle-ci pourrait alors faire baisser un peu la consommation d'essence. Plusieurs constructeurs ou sous-traitants, tels que BMW ou Valeo, poursuivent des recherches en ce sens. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Orr *et al.*, **A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes,** *Applied Thermal Engineering*, vol. 101, pp. 490-495, 2016.

S. Hébert, **La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques,** *Reflets de la Physique*, n° 41, pp. 18-22, octobre 2014.

J.-P. Barrat, **Effet Volta, effet Peltier,** *Bulletin de l'Union des physiciens*, n° 705, pp. 779-785, juin 1988.



QUESTION AUX EXPERTS

L'art préhistorique a-t-il existé ?

Bien que la valeur artistique des œuvres de la Préhistoire nous soit évidente, leurs créateurs étaient plutôt des artisans que des artistes au sens moderne du terme.

Romain PIGEAUD



La statuette de la Dame de Brassempouy, qui date de 21 000 ans.

Domaine public

Les témoignages les plus spectaculaires de l'activité artistique des hommes préhistoriques sont des dessins, des peintures ou des sculptures. Nous connaissons aussi quelques sifflets, flûtes, rhombes et tambours, mais nous n'avons aucune image, sinon difficile à interpréter, prouvant que nos ancêtres dansaient. Quant à l'architecture, les assemblages de concrétions de la grotte de Bruniquel, dans le Tarn-et-Garonne, démontrent à l'évidence que les Néandertaliens savaient organiser l'espace.

Toutefois, s'agissant d'art préhistorique, l'anachronisme menace. L'idée d'un créateur à la très forte personnalité, que sous-tend le cliché de l'artiste en Occident depuis la fin de la Renaissance, est aberrante dans ce contexte. Comme celui de la Renaissance, l'artiste préhistorique ne se distingue guère de l'artisan qui travaille anonymement pour sa communauté. Le tailleur d'outils en silex, par exemple, était un professionnel sans reconnaissance officielle.

On peut se demander comment l'art a débuté. Un débat court depuis la fin du XIXe siècle pour déterminer si la sculpture – un travail dans l'espace, comme la taille – a précédé la peinture ou si c'est l'inverse. Après plus d'un siècle de discussions, le consensus actuel est que les deux formes sont apparues en même temps. Le fait, par exemple, que les dessins de la grotte Chauvet et les statues d'ivoire du Jura souabe datent tous d'environ 36 000 ans semble le corroborer.

Le dessin apparaît comme un processus mental si abstrait et complexe que l'on a eu du mal à admettre son ancienneté. Il faut cependant accepter que les humains dessinent des formes géométriques depuis très longtemps, comme l'illustre un zigzag gravé il y a 500 000 ans sur un coquillage par *Homo erectus*. Du reste, même les chimpanzés savent tracer des motifs identiques pour peu qu'on leur fournisse papier et pinceaux.

L'art, cet instinct animal…

En fait, il semble que la créativité, en tout cas la recherche de formes nouvelles, soit une activité assez partagée dans le monde animal. Ce « phénomène Eurêka » (recherche et plaisir de la découverte) conférerait un avantage évolutif certain, car en activant certaines zones du cerveau, il entretiendrait une certaine souplesse mentale. Son cerveau plus plastique rendrait l'animal davantage capable de s'adapter en cas de changement.

Ainsi, l'art s'enracinerait dans le monde animal. Dès lors, le débat s'est reporté sur l'apparition de l'art figuratif, plus noble sans doute, et ainsi plus à même de nous convaincre de la supériorité du genre humain. D'où la question : quand les premières reproductions d'animaux et d'hommes sont-elles apparues ? Certains préhistoriens pensent que seul *Homo sapiens* a su en réaliser. Le développement de cette compétence, il y a quelque 50 000 ans, serait la conséquence d'un accroissement de la zone préfrontale du cerveau… C'est possible, mais l'anatomie cérébrale semble avoir peu changé depuis l'émergence d'*Homo sapiens* il y a environ 200 000 ans, sans parler du fait que le cortex préfrontal n'est pas la seule zone cérébrale sollicitée dans les processus créatifs.

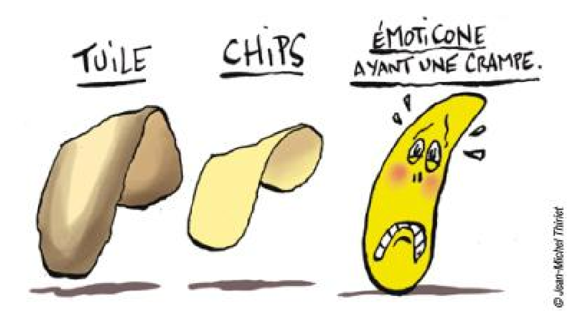
D'après d'autres chercheurs, une phase présymbolique de plusieurs millénaires a précédé l'apparition du comportement symbolique chez l'homme moderne. Mais là encore, l'accent est mis sur *H. sapiens*. Et si l'homme de Néandertal avait aussi pratiqué l'art figuratif ?

Quant à la question « Pourquoi l'art figuratif ? », elle suscite aussi plusieurs théories. Certaines sont fonctionnalistes : l'art aurait servi à envoûter le gibier ou à communiquer avec les esprits. D'autres sont plutôt symboliques : les artistes auraient reproduit les mythes et les histoires de leur groupe, pour les faire revivre le temps d'une cérémonie ou pour en fixer le souvenir. Par exemple, le préhistorien français Norbert Aujoulat, décédé en 2011, pensait que dans la grotte de Lascaux, les Magdaléniens avaient reproduit le cycle des saisons. Pour se situer dans le monde naturel ? Interpréter l'art du passé est manifestement tout un art ! ■

Romain PIGEAUD est chercheur associé au Centre de recherche en archéologie, archéosciences, histoire (CReAAH, unité mixte de recherche 6566), à Rennes.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des tuiles à ne pas rater



© Jean-Michel Thiriet

En refroidissant, les tuiles durcissent. Si besoin est, on peut les réchauffer pour les amollir et rectifier leur forme.

Hervé THIS

En théorie, faire des tuiles est un jeu d'enfant : il suffit de mélanger du blanc d'œuf, du beurre, de la farine, du sucre, des amandes effilées. On étale la pâte obtenue sur une plaque, et la cuisson à four chaud engendre, en une petite dizaine de minutes, des disques mous. On place alors ces derniers sur des bouteilles, afin qu'ils prennent une forme incurvée qu'ils garderont ensuite, ou on leur donne une forme de corolle, par exemple en posant le disque mou sur un bol retourné.

En pratique, il y a deux difficultés : d'une part, à four très chaud, il suffit de quelques minutes de trop pour que le brunissement soit excessif, ce qui s'accompagne d'un goût âcre ; d'autre part, la mise en forme doit être rapide, car la minceur des disques conduit à un durcissement rapide. La pratique culinaire, dictée par les recettes, laisse désarmé en cas d'échec. On ne peut que répéter l'expérience jusqu'à ce que l'on ait bien ajusté les paramètres. Mais de tels tâtonnements sont fastidieux. La modélisation nous aide à faire mieux.

Le blanc d'œuf coagule lors de la cuisson : ses protéines s'enchaînent en un réseau qui emprisonne les autres ingrédients, mais ne contribue pas au durcissement des tuiles lors du refroidissement.

La farine, elle, s'empèse lorsqu'elle est chauffée en présence d'eau (apportée par les blancs d'œufs) : les grains d'amidon libèrent les molécules d'amylose (polymères linéaires dont la brique de base est le glucose), tandis que la structure restante, faite d'amylopectine (des polymères ramifiés dont les briques de base sont également le glucose), absorbe l'eau et gonfle : les grains voisins, très gros, se soudent, avant que l'eau ne soit évaporée en surface des tuiles, formant une croûte.

Troisième élément, l'amande : selon les recettes, elle est sous la forme d'éclats ou de poudre. Composée de 38 % de protéines, de 30 % de « fibres » (des polysaccharides insolubles dans l'eau), de 16 % de matière grasse et de 16 % de sucres, on peut la considérer comme une charge inerte, tout comme le beurre, qui ne fait que fondre et durcir en un solide très mou quand il refroidit.

Le sucre forme enfin un sirop dans l'eau de la préparation et il peut se vitrifier quand il refroidit, mais ce verre peut réabsorber de l'eau et s'amollir ensuite.

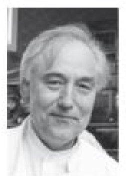
Le durcissement est réversible, mais pas le brunissement

Réexaminons les difficultés. Tout d'abord, le brunissement résulte de diverses réactions, telles que la caramélisation du sucre. Là, il suffit de sortir la plaque du four pour vérifier la couleur. Une cuisson excessive, qui aurait engendré des tuiles trop brunes, ne peut être corrigée (c'est alors… la tuile !).

Le durcissement, s'il n'a pas été trop rapide, n'est pas irréversible. Au cours d'un séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons ainsi formé des tuiles, attendu qu'elles refroidissent et durcissent, puis nous les avons réchauffées, et elles se sont amollies. Nous avons alors répété l'opération. C'est une solution lorsqu'un durcissement intempestif n'a pas donné au pâtissier des objets de la forme voulue.

Former des tuiles incurvées est facile, mais former des corolles (ou « tulipes ») est plus délicat, car les moyens classiquement proposés engendrent des formes qui ne correspondent pas toujours à ce que l'on souhaiterait. Certains proposent de poser le disque chaud sur un ramequin ou dans une coupelle, d'autres conseillent de mouler entre deux surfaces sphériques. Dans tous les cas, les plis résultent du fait que la courbure totale du disque chaud diffère de celle de la sphère. On peut ainsi les favoriser, au lieu de les combattre inutilement.

Et pour finir, quelques pistes : puisque la poudre d'amandes n'est, dans notre analyse, qu'une charge, on comprend que bien des possibilités de remplacement existent. La poudre de noix de coco en est une, mais on utiliserait tout aussi bien de la pistache, de la noix, de la noisette, du thé matcha, des colorants alimentaires, du cacao, de la poudre de mangue nommée amchoor et toutes les poudres que l'on aura obtenues soit par lyophilisation, soit, plus laborieusement, par un long séchage au four. ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

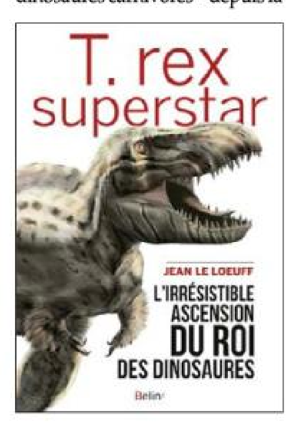
■ PALÉONTOLOGIE

T. rex superstar. L'irrésistible ascension du roi des dinosaures

Jean Le Loeuff
Belin, 2016
(240 pages, 19 euros).

Tyrannosaurus rex, pour le désigner par son nom complet (et non *T. rex*, prononcé, y compris par les Français, « Tirex »), est un dinosaure qui jouit d'un succès certain. Il est le « dinosaure préféré » d'un nombre impressionnant d'adolescents dinomaniaques et les médias l'adorent, désignant, chaque fois qu'il est question de quelque dinosaure carnivore que ce soit, « un cousin du célèbre *T. rex* ». Bref, un fossile plutôt horripilant pour ceux qui considèrent que la paléontologie est une science sérieuse.

Heureusement, derrière ce titre un tantinet racoleur, l'ouvrage de Jean Le Loeuff ne sombre jamais dans l'infantilisation ou le sensationnalisme superficiel qui caractérisent bien souvent les livres sur les dinosaures. Plutôt que se concentrer exclusivement sur *Tyrannosaurus*, il a choisi de viser plus large et retrace les étapes de cette fascination qu'exercent les grands dinosaures carnivores – depuis la première description scientifique d'un de ces animaux, *Megalosaurus*, en 1824. C'est en fait à une histoire culturelle de ces « reptiles géants », comme on avait coutume de dire, que nous convie l'auteur.



Le lecteur apprendra dans ce livre tout ce qu'il faut savoir de réellement important sur *Tyrannosaurus rex*, mais il y découvrira aussi beaucoup d'anecdotes scientifiques ignorées et y trouvera citées des œuvres littéraires plus ou moins oubliées mettant en scène des dinosaures. Alliant une érudition impressionnante à un humour de bon aloi, ce livre très réussi montre, s'il en était besoin, que les dinosaures ne sont pas seulement bons à amuser les enfants, mais qu'ils méritent également l'attention d'un public plus averti.

Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

■ BIOLOGIE-ÉVOLUTION

Le fil de la vie

Jean-Louis Dessalles, Cédric Gaucherel et Pierre-Henri Gouyon
Odile Jacob, 2016
(240 pages, 24,90 euros).

Le titre l'indique, c'est régulièrement répété dans le texte, et mentionné sur la quatrième de couverture : la vie est avant tout information. Cette thèse est présentée comme « une nouvelle description du vivant », éclairage ensuite soutenu par nombre d'exemples. Puisés tant dans l'écologie (scientifique), que dans l'éthologie-communication ou encore dans la biologie moléculaire et la génétique, ils balaient toute la biologie évolutive. Ces trois domaines correspondent aux chevaux de bataille des auteurs. Jean-Louis Dessalles est modélisateur du langage, Cédric Gaucherel est spécialiste de la modélisation en écologie, et Pierre-Henri Gouyon un fin connaisseur de la biologie et de l'évolution.

Est-il nouveau que la biologie moléculaire et la génétique soient fondées sur le code génétique de Crick et Watson ou que la communication animale et l'étude du langage s'appuient sur la théorie de l'information de Shannon ? Évidemment, non. Ce que les auteurs avancent, c'est plutôt que l'information se trouve placée au centre de *toute* la biologie, idée clé qui clôturait *La Logique du vivant* de François Jacob : « Aujourd'hui, le monde est messages, codes, information. »

JEAN-LOUIS DESSALLES
CÉDRIC GAUCHEREL
PIERRE-HENRI GOUYON
LE FIL DE LA VIE
LA FACE IMMATÉRIELLE DU VIVANT
Odile Jacob

En effet, les générations se succèdent quand l'information demeure à travers le génome, comme le rappelle cet essai et comme le martelait Richard Dawkins dans *Le Gène égoïste*. La thèse est convaincante s'agissant de génétique et de communication ; moins lorsqu'elle aborde l'écologie, bien que la démarche modélisatrice choisie soit pertinente pour l'illustrer.

Passant d'un sujet et d'une théorie à l'autre, cet ouvrage constitue une illustration tous azimuts de la thèse centrale de l'importance de l'information, très riche, mais où le foisonnement impose de s'accrocher pour suivre la pensée des auteurs. Cette approche ne peut manquer d'évoquer le magistral livre d'Henri Atlan paru en 1972, *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, toujours d'actualité, où est avancée l'idée selon laquelle la vie donne du sens à ce qui n'en a pas, ce qu'Atlan nomme l'« auto-organisation ».

Ce livre apporte donc une vision stimulante sur différents domaines des sciences de la vie. Sa lecture est tonique, car elle permet de faire le tour des idées en cours et de découvrir des cas spectaculaires de biologie évolutive. Chaque mois apporte des preuves que les adaptations les plus parfaites, qui paraissaient impossibles à expliquer par une nature aveugle, sont rendues possibles par l'évolution darwinienne. En effet, elle ne conserve par le jeu de la sélection naturelle que ce qui fonctionne et se perfectionne.

Pierre Jouventin
Directeur de recherche émérite au CNRS, Montpellier

■ PSYCHOLOGIE-SOCIOLOGIE

Frankenstein aujourd'hui

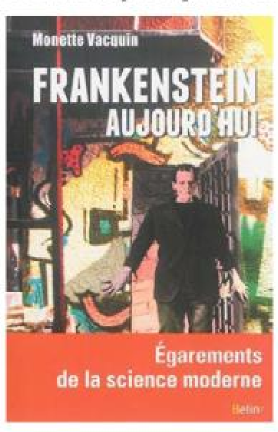
Monette Vacquin
Belin, 2016
(328 pages, 19,50 euros).

Face au pouvoir immense que lui donne la science, l'humanité est-elle assez mature ? Pour Monette Vaquin, l'accélération des possibilités techniques donne toute puissance à l'expression de nos fantasmes et accompagne la marchandisation de l'être humain.

Cette nouvelle édition, augmentée et actualisée, d'un ouvrage de 1989 comporte deux parties distinctes. On y trouve tout d'abord une biographie approfondie de Mary Shelley, donnant

des clés de lecture de son œuvre majeure : *Frankenstein*. Cette partie bien documentée donne plaisir à se plonger dans le petit monde artistique et philosophique des Shelley-Byron en prise avec les bouleversements sociaux.

Sur cette base, Monette Vacquin consacre le reste de son livre à une « Adresse à Mary », qui constitue un essai sur les nouveaux Frankenstein, ceux qui font de la science du vivant un usage inconsidéré. Il s'agit en particulier de donner de la voix contre les pratiques procréatrices artificielles, leurs dérives eugénistes et les atteintes à ce que l'auteure considère comme les fondements psychologiques de notre société. L'écriture est plus expressive et



cette partie est revendiquée comme un appel du sensible pour lutter contre une « raison aveugle à ses propres raisons ».

Tenante du freudisme, Monette Vacquin dénonce l'usage de la science comme fabrique de l'être humain pour satisfaire tous les désirs immatures : procréation médicalement assistée, gestation pour autrui, utérus artificiel, clonage, transhumanisme. Selon elle, en nous libérant d'une forme historique de filiation, la science sape un fondement de ce qui nous rattache à l'humanité.

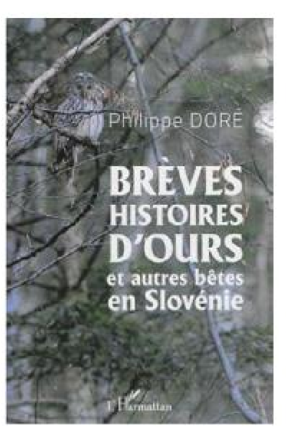
Enrichi d'une préface de Jacques Testart, père scientifique du premier bébé-éprouvette français, et d'une postface du philosophe Olivier Rey, l'ouvrage explicite les revendications de nos contemporains.

Josquin Debaz
Groupe de sociologie pragmatique et réflexive, EHESS, Paris

■ **ÉCOLOGIE-ÉTHOLOGIE**

Brèves histoires d'ours et autres bêtes en Slovénie

Philippe Doré
L'Harmattan, 2016,
(242 pages, 24,50 euros).



Voici un beau carnet de voyage en Slovénie, qui porte bien son titre. Au cœur des Alpes dinariques (celles des Balkans occidentaux), sous les hêtres, une vie fourmille, sur laquelle règne l'ours brun.

Alors, en suivant l'auteur au petit matin, vous rencontrerez ce plantigrade, dernier seigneur des forêts d'Europe. Toutefois, les histoires contées ici ne s'y limitent pas. Construits de façon chronologique de 1997 à fin 2014, les récits correspondent aux séjours de l'auteur, un naturaliste passionné, en Slovénie. L'ours n'y apparaît pas immédiatement. Emmenant le lecteur avec lui en position d'affût, Philippe Doré parvient à lui faire vivre son appréhension progressive de l'espèce, de ce milieu à l'écosystème riche et sa découverte d'un territoire sauvage.

Les chasseurs semblent y régner le jour ; avec quelques autres « fous de Français », l'auteur joue à cache-cache avec ces bipèdes armés pas toujours sympathiques. Ces séjours naturalistes ont pour camp de base l'hôtel-restaurant de Grégor, un Slovène convivial que ces passionnés amusent. Il est d'ailleurs l'auteur des quelques beaux croquis animaliers de ces histoires où l'imagination pallie l'absence de photos.

Philippe Doré nous livre ici, avec modestie et authenticité, des récits de rencontres exceptionnelles. Selon ses propres mots, « la baraka » lui offre de formidables occasions d'observer toute une panoplie de comportements de l'ours brun. Comme lorsque, à plusieurs reprises, il tombe sur des mères et leurs oursons. Mais le doit-il vraiment au hasard ? L'expérience du terrain, la connaissance de l'éthologie et la prise en compte des bons conseils des habitants ont sans aucun doute rendu possibles ces moments comme ce récit simple, rigoureux et poétique.

Farid Benhamou
Laboratoire RURALITES, université de Poitiers





Électrosensibles

Jérôme Bellayer
book-e-book, 2016
(78 pages, 11 euros).

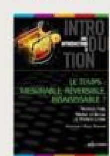
Ceux qui se plaignent des ondes électromagnétiques ont-ils raison ? L'auteur, collaborateur du laboratoire de zététique à l'université de Nice, nous aide à nous forger une opinion sur l'électrosensibilité en répondant à quelques questions. Peut-on la diagnostiquer ? Combien sont touchés ? Que disent les scientifiques ? Les études scientifiques sont-elles bien conçues ? Comment soigner ? Etc. La conclusion de l'auteur est que rien ne prouve que l'électrosensibilité soit vraiment due aux ondes électromagnétiques. Une autre explication est donc à rechercher.



TOC : la maladie de l'hyper-contrôle

Margot Morgiève et Antoine Pelissolo
Le Cavalier Bleu, 2016
(168 pages, 20 euros).

On ignore que les troubles obsessionnels compulsifs (TOC) constituent un problème de santé publique massif. Dans ce texte d'une clarté étincelante, les auteurs, l'un psychiatre et l'autre sociologue, expliquent la nature, les mécanismes, les enjeux pour les personnes concernées et leurs proches, les théories mises au point pour interpréter ces troubles et les traitements les plus efficaces. La compréhension des TOC améliorant la situation de ceux qui en souffrent et de leur entourage, la lecture de ce livre est utile...



Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc
EDP Sciences, 2016
(180 pages, 19 euros).

Absolu chez Newton, le temps devient relatif avec Einstein ; et le sens de son écoulement (la flèche du temps) est intimement lié à la croissance de l'entropie. Parler du temps en physique de façon simple est un défi ! Les auteurs le relèvent avec habileté, en n'oubliant pas d'évoquer les horloges atomiques ultraprécises ou les miroirs à retournement temporel, une très jolie invention récente impulsée par l'un des auteurs et qui a de nombreuses applications.

HÉROS DE LA PENSÉE

Innombrables au cours de l'histoire ont été, et sont encore, ceux qui, en pensant, ont risqué leur vie. Sans avoir forcément laissé une trace majeure en tant que penseurs, ils ont déplu à quelque tyran et, emprisonnés, torturés ou tués, l'ont payé en perdant la liberté. Ce sont des héros de la liberté.



D'autres ont été victimes non d'un tyran, mais de leur propre envergure. Nietzsche, Cantor, Hölderlin, Artaud, Nash, ont connu la folie. Ils se sont aventurés trop loin, ont abordé des zones sombres où raison et déraison ne se distinguent plus. Ils se sont approchés de mystères dont nous, hommes normaux, osons à peine soupçonner l'existence. Leur folie était un vertige. Ils ont « vu quelquefois ce que l'homme a cru voir », et l'ont payé de périodes de stupeur où leur pensée demeurait interdite. Ce sont des héros de la pensée.

ÇA MARCHE OU ÇA AVANCE ?

Y a que le camembert qui marche ! Cette exclamation d'un de mes professeurs relevait de l'humour pédagogique dans ce qu'il a de pire. Elle ne faisait rire personne, mais humiliait l'élève qui, après avoir tâtonné au tableau noir, avait entrevu une solution à l'exercice proposé et s'était écrié : « Ça marche ! » L'enseignant ne tolérait pas une expression si relâchée.

Elle appartient pourtant à une famille d'expressions admises. Tel sujet, dira-t-on, a beaucoup avancé ; tel autre a peu progressé ; un troisième a connu des prolongements étonnants ; un pas décisif a été franchi ; une voie prometteuse s'ouvre... Or marcher n'est-il pas un moyen pour avancer, faire des pas, explorer une voie ?

Le relâchement de « ça marche » tire moins à conséquence que l'image de linéarité véhiculée par ces expressions. Image très peu pertinente – avancer dans un problème peut consister à abandonner une tentative infructueuse, donc à faire demi-tour ! – mais que nous apprécions parce qu'elle est rassurante. Elle sous-entend qu'il y a une direction à suivre, qui nous préexiste. Implicitement, elle répond trop vite « oui » à une immense question : l'évolution des sciences est-elle gouvernée par une nécessité *a priori* ?

Moins fallacieuses sont des images comme : tel sujet a connu des ramifications inattendues ; il a proliféré ; a explosé. En se déployant dans l'espace, elles rendent mieux compte de l'effervescence de la recherche.

D'autres expressions exaltent les belles « mécaniques intellectuelles » que sont certains esprits : ils ont réussi une percée majeure, apporté leur pierre à l'édifice, levé un coin du voile... Comparer leurs prouesses à des processus matériels est à la fois justifié et trompeur. Justifié : tout provient de la matière ; sans elle, l'esprit n'existerait pas. Trompeur : ces expressions induisent, sans qu'on y prenne garde, des conceptions discutables.

DES ESSAIS NON TESTÉS

Si un genre littéraire porte mal son nom, c'est celui de l'essai. Avant d'autoriser un médicament, de faire monter des passagers dans un nouvel avion, de produire un objet en série, on effectue des essais. S'ils décèlent des défauts à corriger, personne n'a



le sentiment de perdre la face. Or les auteurs d'essais ne font pas d'essais ! Leurs éventuelles discussions avec des amis pendant l'écriture ne constituent pas une période d'essai, car elles n'obéissent pas à des procédures codifiées pour s'assurer que la publication n'aura pas d'effets non désirés. Rares sont les auteurs prêts à admettre que l'accueil par le public peut révéler des failles invalidant leurs positions. La plupart s'y accrochent plus volontiers qu'ils ne les révisent. Pour eux, en changer, c'est se déjuger, se montrer inconsistant – autant dire, perdre la face.

LE PROPHÈTE DU PRÉSENT

Plus nombreux sont les gens mêlés à une affaire, moins prévisible est le résultat de leurs interactions. Prévoir ce résultat peut relever autant de la chance que de la lucidité. De toute façon, admirer pour sa lucidité exceptionnelle un personnage qui, seul en son temps, a deviné le cours qu'allait



suivre quelque affaire, c'est commettre un anachronisme, puisque cela revient à tenir compte d'événements postérieurs et à lui reconnaître une supériorité que ses contemporains ne pouvaient pas percevoir.

« Le véritable prophète est celui qui voit le présent », aurait dit Bernanos. De fait, il y a maintes choses autour de nous que nous ne savons pas voir, n'osons pas voir, aimons mieux ne pas voir. Or c'est cela qui importerait, car, du présent, nous avons à rendre compte. Justement, il a tant d'aspects accablants que, plutôt qu'écouter celui qui le décrit – et apprécier, sans anachronisme, sa lucidité –, nous préférons le vilipender. C'est le sort de tous les prophètes dignes de ce nom. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Octobre 2016 – N° d'édition M0770468-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 –
Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur I01/211 836 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

Tout le corps humain en 3 volumes

ATLAS D'ANATOMIE PROMÉTHÉE



9782804185527 - 640 PAGES - 89€

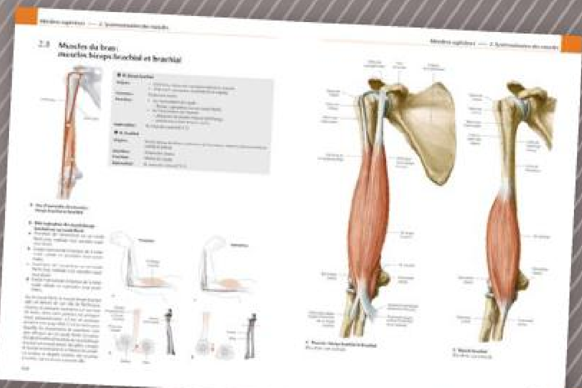
DÉCOUVREZ ÉGALEMENT :

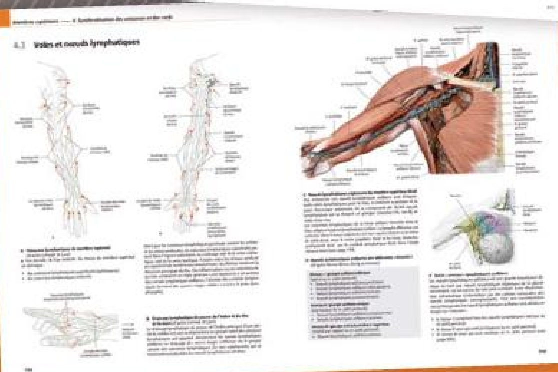


9782804186159 - 560 PAGES - 89€



9782804182984 - 520 PAGES - 89€





- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle, hyperréalistes

deboeck SUPÉRIEUR

En vente en librairie et sur www.deboecksuperieur.com